

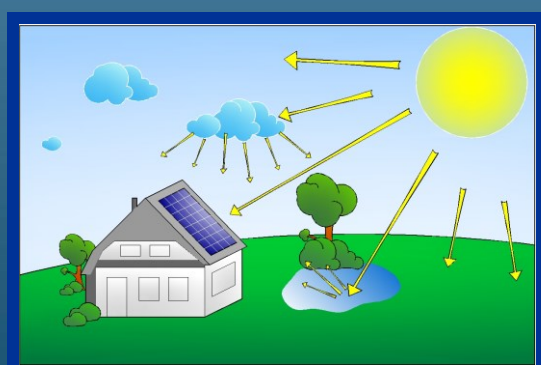
REPORT

Photovoltaik im (Klima-) Wandel

Betrachtung der Potenziale und Perspektiven solarer Stromerzeugung an der deutschen Ostseeküste unter dem Einfluss des Klimawandels

Cindy Dengler

RADOST-Berichtsreihe
Bericht Nr. 15
ISSN: 2192-3140



Kooperationspartner

	Büro für Umwelt und Küste, Kiel BfUK		Leibniz-Institut für Gewässer- ökologie und Binnenfischerei, Berlin IGB
	Geographisches Institut der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel CAU		Leibniz-Institut für Ostseefor- schung Warnemünde IOW
	Coastal Research & Management, Kiel CRM		Institut für ökologische Wirt- schaftsforschung, Berlin IÖW
	EcologicInstitut, Berlin (Koordination) Ecologic		Landesbetrieb Küstenschutz, Nationalpark und Meeres- schutz Schleswig-Holstein, Husum LKN
	EUCC – Die Küsten Union Deutschland, Warnemünde EUCC-D		Landesamt für Landwirt- schaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein LLUR
	GICON – Großmann Ingenieur Consult GmbH – Niederlassung Rostock GICON		Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg StALU MM
	H.S.W. Ingenieurbüro Gesellschaft für Energie und Umwelt mbH, Rostock HSW		Universität Rostock, Fachgebiet Küstenwasserbau URCE
	Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Zentrum für Material- und Küstenforschung HZG		Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundes- forschungsanstalt für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Braunschweig vTI
	Institut für Angewandte Ökosystemforschung, Neu Broderstorf IfaÖ		

REPORT

PHOTOVOLTAIK IM (KLIMA-) WANDEL

BETRACHTUNG DER POTENZIALE UND PERSPEKTIVEN
SOLARER STROMERZEUGUNG AN DER DEUTSCHEN
OSTSEEKÜSTE UNTER DEM EINFLUSS DES
KLIMAWANDELS

Cindy Dengler
GICON – Großmann Ingenieur Consult GmbH

RADOST-Berichtsreihe
Bericht Nr. 15

ISSN: 2192-3140

Rostock, Juli 2012

Inhalt

Vorwort.....	9
1 Einleitung.....	12
2 Photovoltaik.....	14
2.1 Das natürliche Potenzial der Photovoltaik	15
2.1.1 Globalstrahlung.....	15
2.2 Das technische Potenzial der Photovoltaik.....	18
2.2.1 Technik.....	18
2.2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen.....	21
2.3 Das wirtschaftliche Potenzial der Photovoltaik	25
2.3.1 Kosten	26
2.3.2 Einnahmen.....	28
3 Klima und Klimawandel	30
3.1 Klima und Klimawandel an der deutschen Ostseeküste	31
3.1.1 Bisherige Klimaveränderungen	31
3.1.2 Mögliche Klimaänderungen bis 2100.....	32
4 Entwicklung der Potenziale der Photovoltaik unter dem Einfluss des Klimawandels	35
4.1 Einfluss des Klimawandels auf die Parameter des natürlichen Potenzials.....	36
4.1.1 Globalstrahlung.....	36
4.1.2 Zusammenfassung: Folgen des Klimawandels für das natürliche Potenzial der Photovoltaik.....	40
4.2 Einfluss des Klimawandels auf die Parameter des technischen Potenzials	41
4.2.1 Technik.....	41
4.2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen.....	43
4.2.3 Zusammenfassung: Folgen des Klimawandels für das technische Potenzial der Photovoltaik.....	45
4.3 Einfluss des Klimawandels auf die Parameter des wirtschaftlichen Potenzials	46
4.3.1 Zusammenfassung: Folgen des Klimawandels für das wirtschaftliche Potenzial der Photovoltaik.....	47
5 Zusammenfassung.....	48
Literaturverzeichnis	51

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Potenzialdefinitionen für erneuerbare Energien [vgl. WM M-V 2011]	10
Abbildung 2: Einfluss- bzw. Restriktionsbereiche bei der Nutzung erneuerbarer Energien ..	11
Abbildung 3: Anteile der erneuerbaren Energien u.a. am gesamten Stromverbrauch Deutschlands in den Jahren 2010 und 2011 [BMU 2012a]	12
Abbildung 4: Entwicklung der Strombereitstellung und installierten Leistung von Photovoltaik-Anlage in Deutschland 1990-2011 [BMU 2012a]	13
Abbildung 5: Zusammensetzung der Globalstrahlung aus direkter, diffuser und reflektierter Strahlung	15
Abbildung 6: Aufbauprinzip einer Photovoltaik-Anlage	18
Abbildung 7: Entwicklung Endkundenpreis für Photovoltaik-Anlage 2006 bis 2012 [BSW] ..	26
Abbildung 8: Entwicklung der Globalstrahlung (3.600 MJ = 1.000 kWh) seit 1893 am Standort Potsdam (Legende: rote Linie = Jahreswerte, gelb = Mittelwert 1901/2010, blau = gleitender 11j. Mittelwert, grün = 70j. Schwingungen) [DWD 2011]	36
Abbildung 9: mögliche mittlere Änderung des Bedeckungsgrades bis 2050 im Vgl. zu 1961/1990 [Norddeutscher Klimaatlas 08/2012]	38
Abbildung 10: mögliche mittlere Änderung des Bedeckungsgrades bis 2100 im Vgl. zu 1961/1990 [Norddeutscher Klimaatlas 08/2012]	38
Abbildung 11: mögliche mittlere Änderung der Sonnenscheindauer bis 2031/2060 im Vgl. zu 1961/1990 [Norddeutscher Klimaatlas 08/2012]	39
Abbildung 12: mögliche mittlere Änderung der Sonnenscheindauer bis 2071/2100 im Vgl. zu 1961/1990 [Norddeutscher Klimaatlas 08/2012]	39
Abbildung 13: mögliche mittlere Änderung der Anzahl der Sommertage bis 2031/2060 im Vgl. zu 1961/1990 [Norddeutscher Klimaatlas 08/2012]	42
Abbildung 14: mögliche mittlere Änderung der Anzahl der Sommertage bis 2071/2100 im Vgl. zu 1961/1990 [Norddeutscher Klimaatlas 08/2012]	42
Abbildung 15: mögliche mittlere Änderung der Anzahl der heißen Tage bis 2031/2060 im Vgl. zu 1961/1990 [Norddeutscher Klimaatlas 08/2012]	42
Abbildung 16: mögliche mittlere Änderung der Anzahl der heißen Tage bis 2071/2100 im Vgl. zu 1961/1990 [Norddeutscher Klimaatlas 08/2012]	42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Strahlungsleistung je nach Bedeckungsgrad	16
Tabelle 2:	Wirkungsgrade unterschiedlicher Solarzellentypen	19
Tabelle 3:	Eignungsbereich bzw. Flächen mit geringem Konfliktpotenzial	22
Tabelle 4:	Vergütungssätze für eingespeisten Strom aus PV-Anlagen ab dem 01.04.2012	28
Tabelle 5:	Klimaänderungen an der deutschen Ostseeküste bis heute (2009) im Vergleich zur Referenzperiode (1961-1990)	32
Tabelle 6:	Mögliche Änderungen der Temperatur an der deutschen Ostseeküste bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zur Referenzperiode (1961-1990).....	33
Tabelle 7:	Mögliche Änderungen des Niederschlags an der deutschen Ostseeküste bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zur Referenzperiode (1961-1990).....	33
Tabelle 8:	Mögliche Änderungen der Luftfeuchte an der deutschen Ostseeküste bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zur Referenzperiode (1961- 1990)	33
Tabelle 9:	Mögliche Änderungen der Windverhältnisse an der deutschen Ostseeküste bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zur Referenzperiode (1961-1990).....	34
Tabelle 10:	Mögliche Änderungen der Bewölkung an der deutschen Ostseeküste bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zur Referenzperiode (1961- 1990)	34
Tabelle 11:	Parameter mit Einfluss auf die Potenziale der Photovoltaik	35
Tabelle 12:	mögliche Änderungen des Bedeckungsgrades in [%] im Vgl. zu 1961/1990 ..	38
Tabelle 13:	mögliche Änderungen der Sonnenscheindauer in [%] im Vgl. zu 1961/1990 ..	39
Tabelle 14:	mögliche Änderungen der Anzahl der Sommertrage im Vgl. zu 1961/1990 ...	42
Tabelle 15:	mögliche Änderungen der Anzahl der heißen Tage im Vgl. zu 1961/1990	43

Vorwort

Die Vorkommen der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas verringern sich kontinuierlich. In absehbarer Zeit werden diese Energieträger verbraucht sein. Um die verbleibenden Ressourcen so effizient wie möglich zu nutzen, werden Anpassungsstrategien wie gesteigerte Energieeffizienz, Energieeinsparungen und der Umstieg auf andere Energiequellen entwickelt. Aufgrund der Endlichkeit der fossilen Energieträger, aber auch aus Sicht des Klima- und Umweltschutzes wird langfristig eine 100%ige Energieversorgung aus erneuerbaren Energiequellen angestrebt. In diesem Sinn wird im Bereich der erneuerbaren Energien viel in die Forschung nach effizienten und innovativen Techniken sowie in die Anpassung rechtlicher Regelungen und technischer Richtlinien investiert.

Die erneuerbaren Energien stellen nach menschlichen Maßstäben unerschöpfliche Energiequellen dar. Dennoch können von ihrem natürlichen Dargebot bisher nur wenige Promille (Solarstrahlung, Wind) bis Prozente (Biomasse, Erdwärme) tatsächlich in Form von Strom oder Wärme genutzt werden. Die Potenziale der erneuerbaren Energien werden beeinflusst durch technischen Fortschritt und sich verändernden Rahmenbedingungen in Politik und Wirtschaft. Im Bereich der erneuerbaren Energien spricht man daher unter anderem von natürlichen, technischen und wirtschaftlichen Potenzialen der Energien.

Als natürliches Potenzial erneuerbarer Energien wird das innerhalb einer Region und einem bestimmten Zeitraum theoretisch nach physikalischen Gesetzmäßigkeiten nutzbare Energieangebot eines Energieträgers (Erdwärme, Wind, Sonneneinstrahlung oder Biomasse) bezeichnet. Synonym sind auch die Bezeichnungen theoretisches oder physikalisches Potenzial im Gebrauch. Mittels physikalischer Gesetze oder auch Naturgesetze werden Zustände und deren Änderungen eines physikalischen Systems (z.B. Klimasystem) mittels messbarer, eindeutig definierter physikalischer Größen bzw. Parameter oder Variablen beschrieben. Im Bezug auf den Klimawandel sind als Parameter z.B. Lufttemperatur, Niederschlag oder Windgeschwindigkeit zu nennen.

Das technische Potenzial umfasst den Anteil am natürlichen Potenzial, der hinsichtlich der aktuell besten am Markt verfügbaren Technik sowie unter Berücksichtigung struktureller und ökologischer Restriktionen sowie gesetzlicher Vorlagen nutzbar ist. Die wirtschaftliche Machbarkeit bleibt dabei unberücksichtigt. Technische Restriktionen ergeben sich aus den Grenzen für Wirkungsgrade, Anlagengrößen und dem technischen Entwicklungspotenzial der jeweiligen Nutzungstechnologien. Strukturell ergeben sich Nutzungseinschränkungen beispielsweise durch Ortsgebundenheit (Erdwärme) oder einem begrenztem Transportradius (Biomasse) der Energiequelle. Trotz ihrer Vorteile stellen Anlagen zur Nutzung der erneuerbaren Energien auch Eingriffe in die Natur und Landschaft dar, aus denen sich Beeinträchtigungen für diese ergeben können. Zum Schutz der Natur und Landschaft wird die Nutzung der Erneuerbaren durch ökologische Restriktionen eingeschränkt. Dies erfolgt hauptsächlich durch die Gesetzgebung (z.B. Raumplanung oder Schutzgesetze).

Das wirtschaftliche Potenzial umfasst den Anteil des technischen Potenzials, der wirtschaftlich konkurrenzfähig genutzt werden kann. Es ist abhängig von konkurrierenden Systemen sowie vom vorherrschenden Energiepreisgefüge und stellt im Idealfall die Kosten-Nutzen-Situation ohne Berücksichtigung von Fördermaßnahmen dar. Im Bereich der erneuerbaren Energien sind zum Ausgleich der vergleichsweise hohen Gesamtkosten (Investition, Betrieb und Entsorgung) noch Fördermaßnahmen (z.B. EEG-Einspeise-

vergütung) notwendig. In den meisten Fällen ergibt sich daher das wirtschaftliche Potenzial aus der Konkurrenzfähigkeit der gewinnbaren Energie inklusive der aus energiepolitischen Gründen vollzogenen Fördermaßnahmen.

Nach Abzug aller bisher genannten Restriktionen verbleibt das ausschöpfbare Potenzial der erneuerbaren Energien. Dieses wird jedoch selten vollständig realisiert, da zunächst noch subjektive Hemmnisse und Zeitverzögerungen die Ausnutzung vermindern. Subjektive Hemmnisse bzw. soziale Akzeptanzprobleme treten besonders deutlich bei der Diskussion um Windkraftanlagen und Landschaftsbild hervor. So wurden bereits Projekte aus landschaftsästhetischen Gründen nicht realisiert. Zeitverzögerungen entstehen u.a. durch die Prioritätensetzung von Investoren, die sich meist zuerst auf die Projekte mit maximalem Gewinn fokussieren. Abzüglich dieser Komponenten verbleibt das erschließbare Potenzial als der tatsächlich zu erwartende Beitrag zur Energieversorgung.

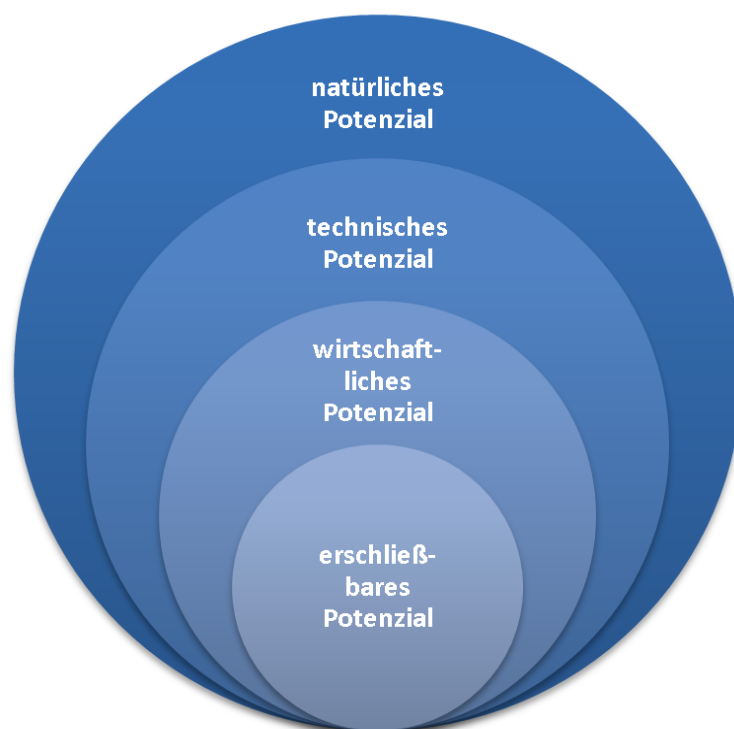


Abbildung 1: Potenzialdefinitionen für erneuerbare Energien [vgl. WM M-V 2011]

Anhand dieser Potenzialdefinitionen ist zu erkennen, dass die Möglichkeiten zur Nutzung der erneuerbaren Energien von vielen Parametern beeinflusst bzw. begrenzt werden. Diese Parameter lassen sich in die Bereiche Natur, Technik, Recht und Wirtschaft einordnen. Die technischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Parameter sind das Ergebnis gesellschaftlicher Entscheidungen. So kann z.B. ein heute noch potenzieller aber verbotener Anlagenstandort durch Gesetzesänderungen morgen schon für die Nutzung wieder freigegeben werden oder andersrum. Wie viel vom erschließbaren Energiedargebot tatsächlich erschlossen wird, richtet sich vor allem nach der Höhe der Nachfrage.

Die Parameter, die das natürliche Potenzial der erneuerbaren Energien bestimmen, unterliegen physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die vom Menschen nicht bzw. nur im geringen Maße bewusst verändert werden können. Der Klimawandel und die dadurch hervorgerufenen Veränderungen der Umweltbedingungen sind laut derzeitigem Wissenstand

zwar zum größten Teil die Folge menschlichen Handelns, sie entziehen sich jedoch vollkommen der menschlichen Kontrolle. Die Veränderung von Umweltbedingungen bzw. -parametern kann sich direkt auf das natürliche Potenzial der erneuerbaren Energien auswirken. Aber auch indirekt kann der Klimawandel die Nutzung der Erneuerbaren beeinflussen. Um sich an unvermeidbare Veränderungen anpassen zu können, ist es wichtig zu wissen in wie weit der Klimawandel Auswirkungen auf die Potenzialparameter der erneuerbaren Energien und damit auf ihre Nutzungsmöglichkeiten haben wird.

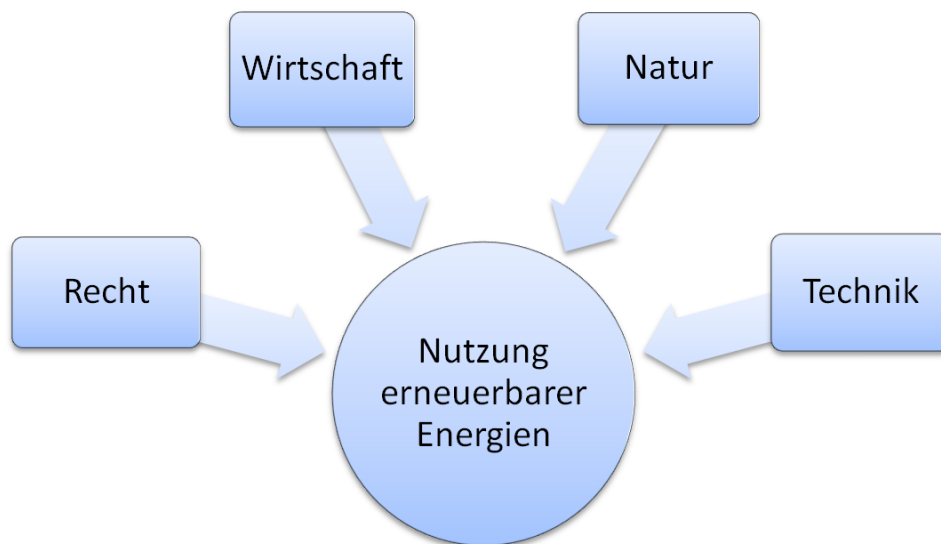


Abbildung 2: Einfluss- bzw. Restriktionsbereiche bei der Nutzung erneuerbarer Energien

Zielstellung in der Bearbeitung des Fokusthemas Erneuerbare Energien ist es, die Auswirkungen veränderter Umweltbedingungen (Klimawandel) auf die Potenziale einiger erneuerbaren Energieformen (Geothermie, Photovoltaik, Windenergie, Biogas) und damit auf die Möglichkeiten ihrer Nutzung zu prognostizieren und ggf. erforderlich werdende strategische Anpassungsempfehlungen zu erarbeiten. Besonderes Augenmerk soll dabei auf die Erzielung von Synergieeffekten bei möglichen Kombinationen der Nutzung Erneuerbarer Energien mit technischen Anlagen aus thematisch völlig anderen Bereichen gelegt werden.

Durch das Aufzeigen der zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels auf die Erneuerbaren Energienutzungen wird es Planern und Entwicklern in der Region ermöglicht, die Ergebnisse gerade bei langfristigen Planungsleistungen in ihre Planungen mit einzubeziehen bzw. eigene Strategien daraus abzuleiten. Dies betrifft nicht nur den Bereich der Erneuerbaren Energien. Ziel ist es, auch Planern und Projektentwicklern aus regional sehr typischen Wirtschaftszweigen, wie z.B. dem Küstenschutz oder maritimen Tourismus die Möglichkeit aufzuzeigen, wie durch eine innovative Herangehensweise die Nutzung der Erneuerbaren Energien von vornherein mit in die Projektplanungen (wie z.B. Küstenschutzanlagen bzw. touristischen Einrichtungen) einbezogen werden können. Hierfür wird insbesondere das Anwendungsprojekt zur Nutzung von Geothermie bei der Planung von Küstenschutzanlagen unter Einbeziehung von touristischen Einrichtungen initiiert und dabei regionale Planer als Dritte mit einbezogen.

1 Einleitung

Mit der in 2011 beschlossenen Energiewende in Deutschland wurde auch der beschleunigte Ausbau der erneuerbaren Energien vereinbart. Bis zum Jahr 2050 soll die Stromerzeugung von rund 80% aus fossiler Energie und Kernenergie auf 80% aus erneuerbaren Energien steigen. Im Jahr 2011 konnten 20% des gesamtdeutschen Stromverbrauchs aus erneuerbaren Energiequellen regeneriert werden. Zum aktuellen Zeitpunkt (Juni 2012) wird der Strombedarf in Deutschland bereits zu 25% aus erneuerbaren Energien gedeckt. [BDEW 26.06.12]

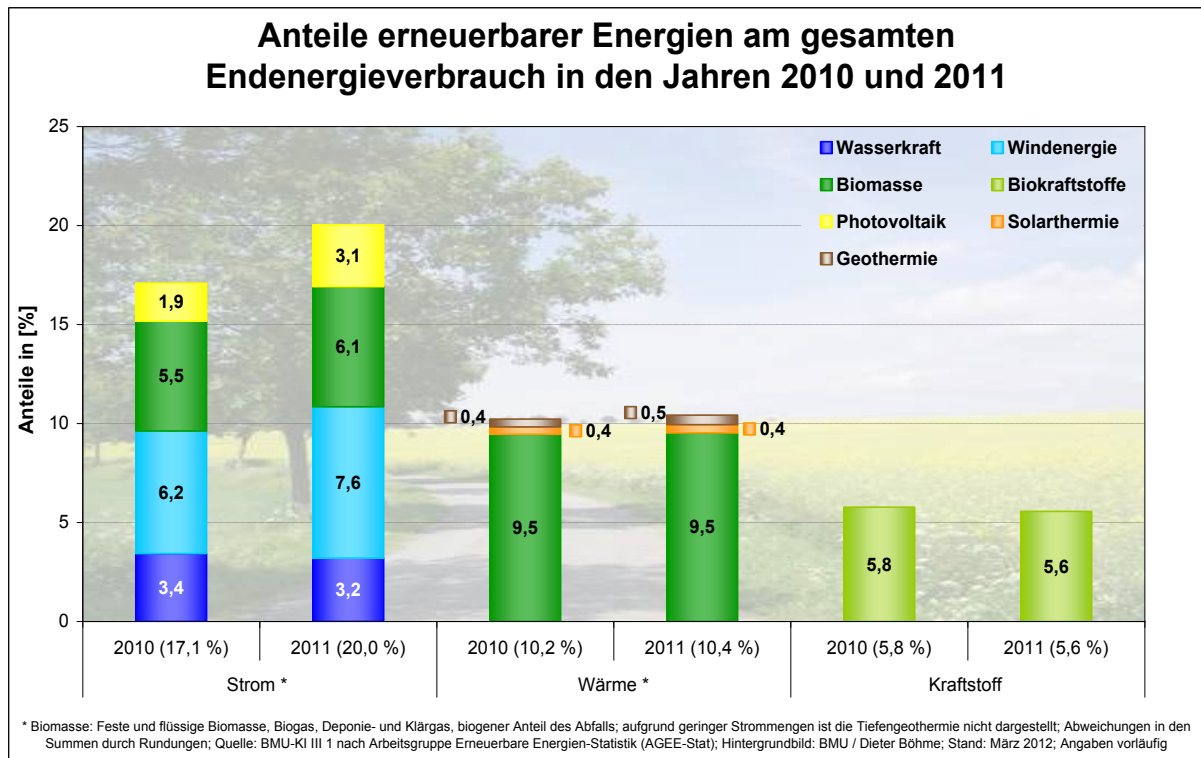


Abbildung 3: Anteile der erneuerbaren Energien u.a. am gesamten Stromverbrauch Deutschlands in den Jahren 2010 und 2011 [BMU 2012a]

Im Jahr 2011 betrug der Gesamtstromverbrauch in Deutschland ca. 609,7 TWh. Der Anteil, der durch die Photovoltaik geleistet wurde, betrug 3,1% (s. Abbildung 3). Gegenüber zum Vorjahr (1,9% in 2010) konnte die Solarstromerzeugung um 61% gesteigert werden. Zuwachsraten in der Solarstromerzeugung von durchschnittlich 50-60% sind seit den Jahren 2008/2009 zu beobachten (s. Abbildung 4). Aktuelle Daten zeigen, dass auch im Jahr 2012 mit einer so hohen Steigerung der solaren Stromproduktion zu rechnen ist. Bis zum Juni 2012 konnte die Photovoltaik ihren Beitrag bereits um 47% im Vergleich zum Vorjahreszeitraum steigern und liegt derzeit bei 5,3%. [BDEW 26.06.12]

Eine hohe gesellschaftspolitische Akzeptanz und relativ stabile politische Rahmenbedingungen konnten den enormen Zubau der in Deutschland installierten Photovoltaik-Leistung in den letzten Jahren ermöglichen. Eine herausragende Bedeutung hatte dabei das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) bzw. dessen 1. Novelle vom August 2004 mit der Einführung der EEG-Vergütung für Photovoltaik-Anlage.

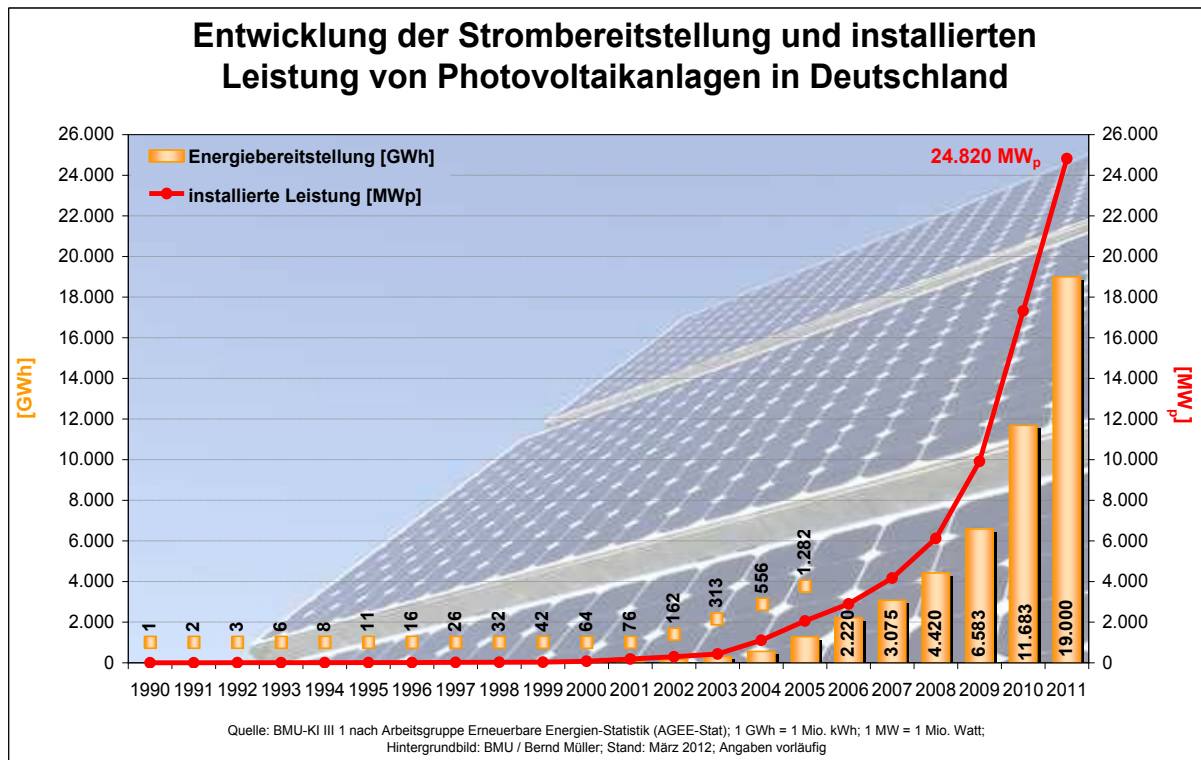


Abbildung 4: Entwicklung der Strombereitstellung und installierten Leistung von Photovoltaik-Anlage in Deutschland 1990-2011 [BMU 2012a]

Die Investitionskosten für Solarstromanlagen haben sich in den letzten drei Jahren mehr als halbiert. [BSW 04.07.12] Die Gestehungskosten für Solarstrom waren mit 0,20 €/kWh [Fraunhofer 2012a] bereits im Jahr 2011 günstiger als die herkömmlichen Stromkosten für private Haushalte mit durchschnittlich 0,25 €/kWh. [BMW i 2012] Unter der Voraussetzung, dass sich die bisherige Entwicklung auch zukünftig fortsetzt, wird sich die Photovoltaik als tragende Säule der zukünftigen Energieversorgung etablieren.

Hinsichtlich der Reduzierung der CO₂-Emissionen ist die Photovoltaik als alternative, erneuerbare Energie von besonderer Bedeutung. Die Nutzung von Solarstrom statt herkömmlich produzierten Stroms trägt zur Reduzierung des Ausstoßes von Treibhausgasen und damit zur Minderung der Folgen des Klimawandels bei. Die Nutzung der Photovoltaik hat also Auswirkungen auf den Klimawandel.

Andersherum könnte der Klimawandel aber auch die Nutzung der Photovoltaik beeinflussen. Wie sich die Potenziale der Photovoltaik unter dem Einfluss des Klimawandels entwickeln, soll hier näher betrachtet werden. Der vorliegende Bericht befasst sich mit der Analyse und Prognose der Potenziale der Photovoltaik an der deutschen Ostseeküste. Dabei wurde folgende Vorgehensweise gewählt.

1. Erläuterungen zur Photovoltaik und ihren Potenzialparametern
2. Betrachtung des Klimas und des Klimawandels an der deutschen Ostseeküste
3. Ermittlung eventueller Veränderungen der Potenzialparameter durch den Klimawandel und Schlussfolgerung der Entwicklungsperspektiven der solaren Stromerzeugung aufgrund veränderter Potenzialparameter

2 Photovoltaik

Als Photovoltaik wird der Zweig der Energietechnik bezeichnet, der sich mit der Umwandlung von solarer Strahlungsenergie (Photonen) in elektrische Energie beschäftigt.

Mit der Nutzung der Photovoltaik als erneuerbare Energiequelle werden viele positive Aspekte assoziiert. So stellt die Sonne eine für den Menschen unerschöpfliche Energiequelle dar. Die Strahlungsenergie der Sonne ist ein sogenanntes freies Gut, das heißt, sie steht jedem jederzeit kostenfrei zur Verfügung. Allerdings ist sie auch eine fluktuierende Energie, die stark von meteorologischen Bedingungen abhängig ist.

Bei der Umwandlung der solaren Strahlungsenergie (Photonen) in elektrische Energie (Solarstrom) mithilfe von Solarzellen entstehen keine CO₂-Emissionen oder sonstige klima- oder umweltschädlichen Stoffe. Zudem macht die Nutzung der Photovoltaik als eine erneuerbare Energiequelle unabhängig von fossilen Energieträgern und damit von Energieimporten und fremdbestimmten Energiepreisen. Die Gestehungskosten für Solarstrom werden zukünftig eher sinken. Dagegen werden die Kosten für Strom aus fossilen Energieträgern aufgrund ihrer Knappheit mittelfristig rapide ansteigen. Die Investition in eine Photovoltaik-Anlage ist noch relativ kostenintensiv. Da die Photovoltaik-Anlagen aber stetig leistungsfähiger und günstiger werden, amortisieren sich in immer kürzeren Zeitspannen. Zudem werden Photovoltaik-Anlagen derzeit noch für die Dauer von 20 Jahren durch die EEG-Einspeisevergütungen finanziell unterstützt.

Die garantierte Lebensdauer für die Solarmodule beträgt derzeit durchschnittlich 25 Jahre. Jedoch lässt die Leistung der Solarmodule mit der Zeit nach und beträgt nach 20 bis 25 Jahren nur noch etwa 80% der ursprünglichen Nennleistung. Obwohl die Photovoltaik-Anlagen im regulären Betrieb relativ wartungsarm sind, stellt der Wechselrichter eine Schwachstelle im Photovoltaik-Anlagensystem dar. Seine störungsfreie Funktionsdauer beträgt durchschnittlich 10-14 Jahre. Dann muss er meist relativ kostenintensiv ausgetauscht werden. Zur Absicherung von Schäden und Leistungsausfall infolge von Naturkatastrophen, Diebstahl usw. gibt es auch für Photovoltaik-Anlagen eine Vielzahl von Versicherungen.

Last but not least bieten Solarmodule auch architektonische Gestaltungsmöglichkeiten. So kann beispielsweise die Optik eines Hauses positiv verändert und können ästhetische Akzente gesetzt werden. Dies ist in den meisten Fällen nur beim Neubau von Gebäuden eine rentable Option. Zudem ist die Ästhetik von Photovoltaik-Anlagen vor allem eine Frage des persönlichen Empfindens. Hierzu stehen häufig Solarparks bzw. sogenannte Photovoltaik-Freiflächenanlagen in der Kritik das Landschaftsbild zu beeinträchtigen. Die Photovoltaik ist aufgrund der relativ geringen Wirkungsgrade eine sehr raumgreifende Technik zur Stromerzeugung. Dies ist vor allem der Fall, wenn Solarstrom in größeren Mengen erzeugt werden soll.

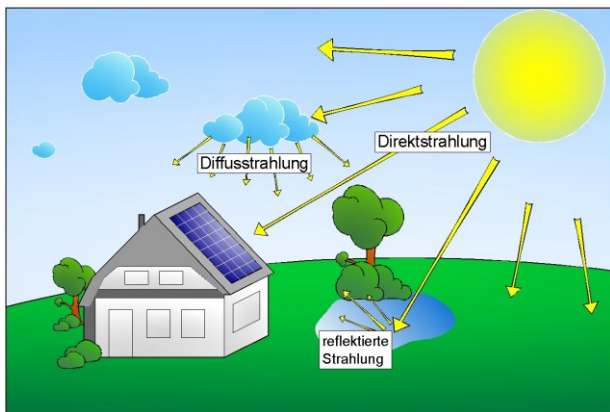
Trotz allen möglichen Hindernissen gilt die Photovoltaik als technisch ausgereift und wettbewerbsfähig. Sie ist als Technik zur Energieerzeugung in Deutschland etabliert, das heißt, es gibt geregelte Genehmigungsverfahren, maßgeschneiderte Förderungs- und Finanzierungsprogramme sowie ein breites und etabliertes Netzwerk an Herstellern, Händlern, Installateuren und Servicedienstleistern. Ein vielfältiges Produktangebot stellt sicher, dass die Potenziale der Solarenergie an jedem möglichen Photovoltaik-Anlagen - Standort bestmöglich ausgeschöpft werden können.

2.1 Das natürliche Potenzial der Photovoltaik

Das natürliche Potenzial des Solarstroms schöpft sich aus der Strahlungsenergie der Sonne, die auf die Erde trifft. Die Solarkonstante, also langjährig gemittelte extraterrestrische Sonnenbestrahlungsstärke, die senkrecht auf den Querschnitt der Erde trifft, beträgt ca. 1.368 W/m^2 . [DWD] Was von dieser Strahlung nach dem Durchgang durch die Erdatmosphäre den Erdboden erreicht (Globalstrahlung), kann für die solare Stromerzeugung genutzt werden.

2.1.1 Globalstrahlung

Die Globalstrahlung gilt als wichtigster Einflussfaktor für die Erzeugung von Solarstrom. Als Globalstrahlung wird die gesamte auf eine waagerechte Fläche bestimmter Größe (meist 1 m^2) auftreffende Sonnenstrahlung definiert. [DWD] Sie setzt sich zusammen aus der direkten, diffusen und reflektierten Sonneneinstrahlung.



Extinktion (lat.: Schwächung)

ist ein Maß für die Abschwächung einer Strahlung nach Durchqueren eines Mediums. An der Abschwächung sind im Allgemeinen die Prozesse Absorption, Streuung, Beugung und Reflexion beteiligt.

[nach DIN 1349]

Abbildung 5: Zusammensetzung der Globalstrahlung aus direkter, diffuser und reflektierter Strahlung

Die Intensität der Globalstrahlung hängt von verschiedenen Faktoren ab. Eine Abschwächung (Extinktion) der Strahlung erfolgt bereits auf dem Weg durch die Atmosphäre durch Reflexion, Streuung und Absorption an den Luftmolekülen, Ozon, Wasserdampf oder anderen atmosphärischen Spurengasen. Auch Luftverschmutzung meist in Form von Rauch und Staub u.a. aus Industrie und Verkehr hält Strahlung beim Durchgang durch die Atmosphäre auf. Mit zunehmender Nähe zur Erdoberfläche steigen die Luftdichte und damit auch der Grad der Strahlungsminderung. Umgekehrt heißt das, dass mit zunehmender Höhenlage eines Standortes über dem Meeresspiegel auch die Globalstrahlung an diesem Ort steigt. Der Strahlungsverlust beim Durchgang durch die Erdatmosphäre kann bis zu 30% betragen.

Wesentlichen Einfluss auf die Höhe der Globalstrahlung hat der tägliche sowie saisonale Sonnenstand bzw. Sonnenlauf, der je nach geografischer Lage eines Standortes in Verbindung mit der Erdrotation um die Sonne sowie um die eigene Achse variiert. Je höher und länger die Sonne am Himmel über einem Standort steht, desto höher fällt an diesem Ort das solare Strahlungsangebot aus. Die höchsten Einstrahlungswerte werden am Äquator

erreicht, wo die Sonneneinstrahlung um die Mittagszeit senkrecht auf die Erdoberfläche auftrifft. In der Sahara, in Äquatornähe, werden aufgrund der überwiegend senkrechten und ganzjährig relativ konstanten Sonneneinstrahlung Werte zwischen 2.200 bis 2.800 kWh/a, also 250 bis 320 W/m² erreicht. [DLR 2010]

In Deutschland, beträgt die eingestrahlte Energiemenge pro Jahr und Quadratmeter durchschnittlich nur 900 bis 1.200 kWh (ca. 100 bis 135 W/m²). Das liegt u.a. daran, dass durch die geografische Lage Deutschlands die Sonne nicht im rechten Winkel einstrahlt. Aufgrund der Krümmung der Erdkugel steht die sommerliche Mittagssonne 60° bis 65° hoch und strahlt bei idealen Wetterbedingungen mit einer Bestrahlungsstärke von etwa 700 W/m². Im Winter sind es nur 13° bis 18° und maximal 247 W/m². Die saisonalen Schwankungen der Globalstrahlung können das Fünf- bis Zehnfache betragen.

Unabhängig von der Jahreszeit können aber auch entsprechende Witterungsverhältnisse starke Schwankungen der Strahlungswerte verursachen. Diese Schwankungen können sich zudem sehr kurzfristig innerhalb von Stunden oder Tagen ergeben. Hierbei spielen vor allem die Klimaparameter Bewölkungsgrad und Sonnenscheindauer. Der Deutsche Wetterdienst definiert Sonnenscheindauer als die tatsächliche Dauer der direkten Sonnenstrahlung an einem bestimmten Ort innerhalb eines definierten Zeitraumes. Das Norddeutsche Klimabüro definiert sie als den stündlichen Wert, bei dem die direkte einfallende kurzweilige Sonnenstrahlung 120 W/m² übersteigt. Wie Tabelle 1 jedoch zeigt, können auch bei bedecktem Himmel noch Strahlungswerte von über 120 W/m² erreicht werden.

Die Anzahl der Sonnenstunden beträgt in Deutschland jährlich zwischen 1.300 bis 1.900 Stunden. Als bundesweites Gebietsmittel für 2010 ergab sich zum Beispiel eine Sonnenscheindauer von 1538,2 Stunden. Das sind 9,8 Stunden oder 0,6 Prozent mehr als in der Referenzperiode von 1960 bis 1990. [DWD]

Doch auch bei bedecktem Himmel gelangt solare Strahlung als sogenannte diffuse Strahlung auf die Erdoberfläche. Je nach Bedeckungsgrad kann die Globalstrahlung dabei bis auf ca. 10% der Strahlungsleistung der Direktstrahlung zurückgehen. Von idealen 700 W/m² würden demnach nur noch 70 W/m² übrig bleiben. Örtlich können zudem Smog (Luftverschmutzung), Sandstürme, Vulkanausbrüche, Waldbrände etc. die Strahlungsleistung verringern. Tabelle 1 zeigt durchschnittliche Strahlungswerte für Deutschland abhängig von Bedeckungsgrad und Jahreszeit.

Tabelle 1: Strahlungsleistung je nach Bedeckungsgrad

Bedeckungsgrad	Strahlungsleistung in W/m ²	
	Sommer	Winter
Sonnenschein, klarer bis leicht diffuser Himmel	600 – 1.000	300 - 500
Sonnenschein bei leichter bis mittlerer Bewölkung	300 - 600	150 - 300
stark bewölkt bis neblig-trüb	100 - 300	50 - 150

Quelle: zusammengestellt aus Daten von: <http://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenschein>, Stand 08/2012

Wenn auch gering, kann das lokale Strahlungsangebot in Form von diffuser Strahlung durch die Reflektionen von Oberflächen verstärkt werden. Der Reflexionsgrad des Bodens wird als Albedo bezeichnet. Er wird bestimmt durch den Quotienten aus reflektierter zu einfallender Lichtmenge und liegt zwischen 0 und 1. Ein Rückstrahlvermögen von Null entspricht einer vollständigen Absorption und von Eins einer vollständigen Reflexion des einfallenden Lichts. Vor allem glatte und helle Flächen, wie z.B. frisch gefallener Schnee haben einen hohen Albedowert. Dieser Fakt kann beispielsweise bei der Standortplanung von Photovoltaik-Anlagen als begünstigender Effekt beachtet werden. Umgekehrt ist bei der Standortplanung auf große schattenwerfende Elemente in der naheliegenden Landschaft wie etwa Geländeerhebungen, Vegetation oder Bebauung zu achten. Je nach Höhe der Elemente sowie Sonnenstand können große Schatten das lokale Strahlungsangebot enorm mindern.

Parameter des natürlichen Potenzials der Photovoltaik

Die Globalstrahlung ist der wichtigste Parameter des natürlichen Potenzials der Photovoltaik. Die Intensität der Globalstrahlung wird durch folgende Parameter beeinflusst:

- Zusammensetzung der Erdatmosphäre
- geografische Lage (Sonnenstand)
- Bewölkung bzw. Sonnenscheindauer
- Standorteigenschaften (Albedo, schattenspendende Landschaftselemente)

2.2 Das technische Potenzial der Photovoltaik

Das technische Potenzial der Photovoltaik ist der Anteil des natürlichen Potenzials, der unter Berücksichtigung der Grenzen der Nutzungstechnologien sowie infrastruktureller und ökologischer Restriktionen tatsächlich nutzbar gemacht werden kann.

2.2.1 Technik

Solarstrom wird mithilfe von Photovoltaik-Anlagen erzeugt. Die wichtigsten Komponenten einer Photovoltaik-Anlage sind der Solargenerator und das Netzeinspeisegerät (NEG), welches umgangssprachlich auch Wechselrichter genannt wird. Weitere Komponenten sind z.B. der Einspeisezähler, der Strombezugszähler bei Eigenverbrauch, Akkumulatoren bei Inselanlagen, Verkabelung und Montagegestell der Solarmodule.

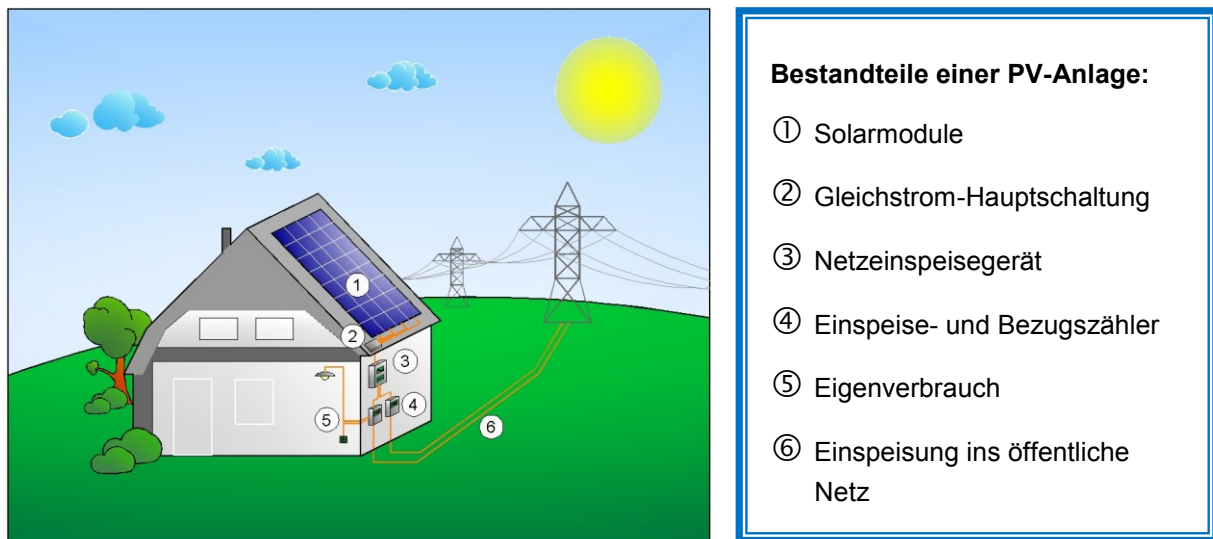


Abbildung 6: Aufbauprinzip einer Photovoltaik-Anlage

Das Netzeinspeisegerät wandelt den in den Solarmodulen erzeugten Gleichstrom in Wechselstrom um. Zudem regelt das NEG Strom und Spannung so, dass die Photovoltaik-Anlage eine höchstmögliche Leistung ausgibt. Dafür stellt das Gerät schnell und genau den Arbeitspunkt auf der Stromspannungskennlinie des Modulstrings ein. Eine weitere Aufgabe des NEG ist das Überwachen des Netzanschlusses. Bei Ausfall des öffentlichen Stromnetzes schaltet es sekundenbruchteilsschnell die Solarstromanlage aus Sicherheitsgründen ab. Das NEG erfasst und speichert Betriebsdaten und Fehlermeldungen und macht diese Daten über ein Display sichtbar. Je nach Ausführung hat ein NEG einen Wirkungsgrad von 90 bis zu 98%. Jede Photovoltaik-Anlage hat mindestens ein, je nach Modulanzahl, Anlagenleistung, Konfiguration und benötigten Wechselrichtertyp auch mehrere NEG installiert. [Solaranlagen-Portal 2012]

Das Kernstück einer Photovoltaik-Anlage sind die Solarzellen. Solarzellen bestehen aus zwei Halbleiterschichten, meist aus Silizium, zwischen denen durch Einwirkung von Sonnenlicht eine elektrische Spannung entsteht (photovoltaischer Effekt). Mehrere Solarzellen werden in

Reihe oder parallel zu Modulen zusammengeschlossen, die einerseits in oder an Gebäudehüllen installiert oder als freistehende Anlagen aufgestellt werden können. Mehrere zusammengeschlossene Module werden als Solargenerator bezeichnet.

Aktuell beherrschen zwei gängige Typen von Solarzellen den Photovoltaik-Markt. Kristalline Solarzellen und amorphe Solarzellen, welche auch als Dünnschichtzellen bezeichnet werden. Beide Zellentypen werden aus Silizium hergestellt. Kristalline Solarzellen werden je nach Herstellungsverfahren weiter in monokristalline und polykristalline Solarzellen unterschieden. Monokristalline Solarzellen haben eine ebene, glatte Oberfläche und sind von der Farbe sehr dunkel bis schwarz. Diese Eigenschaften rühren von der ebenmäßigen Anordnung ihrer Atome her. Die Herstellung der monokristallinen Solarzellen ist sehr energieaufwendig, weshalb sie teurer als die polykristallinen Solarzellen sind. Der Wirkungsgrad der monokristallinen Solarzellen ist jedoch mit 14 bis 18% höher als der der polykristallinen Solarzellen (12 bis 16%). Die Oberfläche der polykristallinen Solarzellen ist von einem intensiven Blau und dem typischen Glitzern der relativ großen Silizium-Kristalle gekennzeichnet. Dieses Aussehen birgt jedoch den Nachteil, dass Module mit diesen Solarzellen wegen der helleren Oberflächen eine geringere Energieausbeute besitzen.

Dünnschichtzellen sind – wie der Name impliziert – ca. 100-fach dünner als herkömmliche kristalline Solarzellen. Grund dafür ist das Produktionsverfahren, indem das Halbleitermaterial Silizium oder andere Beschichtungsmaterialien wie Cadmiumtellurid (CDTe) oder Kupferindiumdiselenid (CIS) in einer dünnen Schicht auf das Trägermaterial (z. B. Glas) aufgedampft oder aufgesprüht wird. Die Schichtdicken betragen weniger als 1 µm. Diese Herstellungsweise ist günstiger als die der kristallinen Solarzellen, da hier ein geringerer Siliziumbedarf besteht. Zudem sind Dünnschichtzellen flexibel einsetzbar, da sich durch Einsatz von Kunststoff z.B. biegsame Solarmodule herstellen lassen. Der Wirkungsgrad von Dünnschichtzellen ist niedriger als der von kristallinen Solarzellen und liegt derzeit durchschnittlich bei 10%.

Tabelle 2: Wirkungsgrade unterschiedlicher Solarzellentypen

Baumaterial der Solarzelle	Zellwirkungsgrad
monokristallines Silizium	Ø 14 - 18 %
polykristallines Silizium	Ø 12 - 16 %
amorphes Silizium	Ø 10 %

Quelle: zusammengestellt aus Daten von www.solaranlagen-portal.de

Die optimale Leistung eines Solarmodules unter genormten Testbedingungen (1000 W/m² Einstrahlung, 25°C Modultemperatur, 1,5 Air Mass) wird in Watt peak (Wp) oder Kilowatt peak (kWp) angegeben. Peak (engl.: Spitze) deutet dabei auf die Spitzenleistung bzw. die theoretisch höchstmögliche Leistung einer Photovoltaik-Anlage. Abhängig vom Wirkungsgrad einer Solarzelle kann grob die zur Erzeugung von einem Kilowatt peak notwendige Modulfläche berechnet werden. Ein Modul mit einem Zellwirkungsgrad von 10% benötigt unter Einhaltung der Testbedingungen eine 1 m² große Fläche für die Erzeugung von 100 Wp Solarstrom.

Verschiedene Faktoren können den Zellwirkungsgrad beeinträchtigen. So verringert er sich beispielsweise mit zunehmenden Temperaturen über 25°C. Allgemein kann man ca. 0,5% Leistungsminderung pro Grad Celsius angeben. Erhöht sich die Temperatur eines Solarmoduls von den (laut Testbedingungen) vorgesehenen 25°C z.B. auf 55°C, sinkt die Modulleistung um ca. 15%. Wird die Zelle / das Solarmodul durch eine gute Belüftung gekühlt, kann man diese Verluste um gut 5% verringern. [Solaranlagen-Portal 2012]

Ertragsmindernd wirkt sich auch eine Verschattung der Solarzellen bzw. -module aus, da sich die verschatteten Teile der Solarmodule dann als Widerstand im Stromkreis verhalten. Eine Lösung dieses Problems kann durch sogenannte Bypass-Dioden erfolgen, die den Strom an dem abgeschatteten Modul vorbeileiten. Verschattungen entstehen durch Ablagerungen von Laub, Schnee, Staub oder Vogelkot auf den Solarmodulen, aber auch durch schattenwerfende Objekte in der näheren Umgebung, wie z.B. hohe Bäume, Gebäude, Antennenmasten etc. Der Aufstellungsort einer Photovoltaik-Anlage befindet sich demnach idealerweise nicht in einer baumreichen Landschaft und nicht in der Nähe von intensiven Staubquellen. Bei Verschmutzungen durch Laub, Ruß oder Staub trägt eine Modulneigung ab 25° zur Selbstreinigung des Solarmoduls bei.

Der Aufstellwinkel von Solarmodulen richtet sich im Allgemeinen nach dem Einfallswinkel der Solarstrahlung. Um sie bestmöglich ausnutzen zu können, sollte sie senkrecht auf das Solarmodul auftreffen. In Mitteleuropa bzw. in Norddeutschland ist der Einstrahlungswinkel der Sonne aufgrund der geografischen Lage entsprechend niedrig (ca. 20° im Winter und 60° im Sommer). Optimal sind eine Süd-Ausrichtung der Solarmodule mit einer maximalen Abweichung von je 30° nach Westen oder Osten, sowie ein Neigungswinkel zwischen 30° und 40°. Unter dieser Ausrichtung erhöht sich die Einstrahlungssumme auf die Modulebene bis zu 15%, bezogen auf die horizontale Einstrahlungssumme. [Fraunhofer 2012b] Noch besser im Energieertrag sind dem Sonnenverlauf nachgeführte Photovoltaik-Anlagen. Hier kann der Mehrertrag gegenüber fest installierten Anlagen nach Herstellerangaben bis zu 30% betragen. [mp-tec 2012]

Der tatsächliche Energieertrag einer Photovoltaik-Anlage entspricht, infolge der potenziellen Ertragsverluste aus den oben genannten Gründen sowie durch Verluste durch Leitungswiderstände und durch den Wechselrichter, nicht den Ertragswerten, die die Solarmodule unter optimalen Bedingungen erreicht werden können. Das Verhältnis zwischen dem tatsächlichen Energieertrag der gesamten Photovoltaik-Anlage zum theoretisch möglichen Energieertrag wird mit der Performance Ratio PR dargestellt. Die PR leistungsfähiger, fabrikneuer Photovoltaik-Anlage liegt derzeit bei einem Wert von 0,8 bis 0,9 bzw. 80-90%. [Fraunhofer 2012b]

Über die Jahre sinkend bei jeder Photovoltaik-Anlage der Wirkungsgrad, die Performance Ratio und damit auch der Stromertrag ab. Photovoltaik-Anlagen sind für eine Lebensdauer von mindestens 20 Jahren konzipiert. Auch unter optimalen Betriebsbedingungen unterliegen die auf diese Dauer allgemeinen Verschleiß- bzw. Alterungserscheinungen wie z.B. die Korrosion des Schutzglases, Moosbildung auf der Moduloberfläche oder Zellkorrosion aufgrund eindringender Feuchtigkeit. Diese Alterung (Degradation) ist materialabhängig und variiert je nach Modultyp. Die stärkste Degradation erfahren die Solarmodule zu Beginn ihrer Betriebszeit. Werte zwischen 2% (kristalline Solarzellen) bis zu 15% (Dünnschicht-Module) sind möglich. Nach dieser anfänglichen ca. ein bis zwei Jahre dauernden Leistungsabnahme beträgt die jährliche Degradation nur noch ca. 0,2 – 0,25%. [DCTI 2012]

2.2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

Photovoltaik-Anlagen sind bauliche Anlagen im Sinne des Baurechts und bedürfen in der Regel einer Baugenehmigung nach den jeweiligen Landes-Bauordnungen. Laut der Landesbauverordnung Mecklenburg-Vorpommerns sind Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung wie Solarenergieanlagen und Sonnenkollektoren in und an Dach- und Außenwandflächen sowie gebäudeunabhängig mit einer Höhe bis zu 3 m und einer Gesamtlänge bis zu 9 m verfahrensfrei. [LBauVO M-V §61] So verhält es sich in den meisten Bundesländern. Genehmigungsfrei heißt dabei, dass das Bauvorhaben nicht von einer Behörde auf seine baurechtliche Zulässigkeit überprüft wird. Der Bauherr ist für die Einhaltung der baurechtlichen Vorschriften (z.B. Standsicherheit, Brandschutz etc.) selber verantwortlich.

Weicht die Solaranlage in Form, Größe, Standort, Beschaffenheit von den baurechtlichen Normen ab, kann es sein, dass die Anlage genehmigt werden muss. Dies ist vom jeweiligen Bundesland abhängig und sollte beim zuständigen Bauamt nachgefragt werden. Die Installation auf bzw. an unter Denkmalschutz bzw. in der Nähe von Denkmälern stehenden Gebäuden (Ensembleschutz) ist beispielsweise in vielen Fällen verboten bzw. trifft auf Ablehnung in der Bevölkerung. Teilweise kann aber, je nach den kommunalen Gestaltungssatzungen und Bauvorschriften, eine Installation von Photovoltaik-Anlagen unter Ergreifung besonderer Maßnahmen, z.B. die Vermeiden von der Dachhaut abgeneigter Aufständigung, die Integration der Solaranlage in das Dach des Gebäudes, die Nutzung farbiger Solarmodule oder aber Solardachziegel möglich.

Übersteigt die Größe einer geplanten Photovoltaik-Anlage die Möglichkeit einer Installation in, an und auf Dach- und Außenwandflächen bzw. ist sie größer als die von den Landesbauverordnungen vorgegebenen 3 m x 9 m und wird gebäudeunabhängig aufgestellt so spricht man von einer sogenannten Freiflächenanlage.

Freiflächenanlagen dienen im Wesentlichen dazu möglichst viel energetischen und damit finanziellen Ertrag zu erwirtschaften. Hierfür werden bestenfalls mehrere Hektar große Flächen gesucht. Diese sind selten im bauplanungsrechtlichen Innenbereich, also innerhalb bebauter Siedlungsgebiete zu finden. Grundsätzlich sind PV-Vorhaben im planungsrechtlichen Außenbereich nur dann zulässig, wenn von ihnen keine Beeinträchtigung öffentlicher Belange ausgeht. Eine Beeinträchtigung öffentlicher Belange liegt laut §35 Abs.1 Nr.8 BauGB beispielsweise dann vor, wenn das Vorhaben

- den Darstellungen des Flächennutzungsplans widerspricht,
- den Darstellungen eines Landschaftsplans oder sonstigen Plans, insbesondere des Wasser-, Abfall- oder Immissionsschutzrechts, widerspricht,
- schädliche Umwelteinwirkungen hervorrufen kann oder ihnen ausgesetzt wird,
- unwirtschaftliche Aufwendungen für Straßen oder andere Verkehrseinrichtungen, für Anlagen der Versorgung oder Entsorgung, für die Sicherheit oder Gesundheit oder für sonstige Aufgaben erfordert oder
- Belange des Naturschutzes und der Landschaftspflege, des Bodenschutzes, des Denkmalschutzes oder die natürliche Eigenart der Landschaft und ihren Erholungswert beeinträchtigt oder das Orts- und Landschaftsbild verunstaltet.

Durch die oft mehrere Hektar großen Photovoltaik-Freiflächenanlagen sind erhebliche Auswirkungen auf die Schutzgüter Boden und Landschaftsbild zu erwarten. Aber auch auf Pflanzen, Tiere und die biologische Vielfalt kann sich ein Solarpark, bei unsachgerechter Standortplanung (z.B. Nutzung von Rastvogelgebieten) oder großflächiger Ausformung erheblich auswirken. Konflikte mit den Schutzgütern Wasser, Klima und Mensch sind eher gering und im Wesentlichen auf die Bauzeit beschränkt. Potenzielle Beeinträchtigungen für Natur und Landschaft durch Photovoltaik-Freiflächenanlagen ergeben sich z.B. aus folgenden Wirkfaktoren

- Flächenverbrauch, -inanspruchnahme,
- Barrierewirkung bzw. Zerschneidung von Lebensräumen,
- visuelle Wirkung durch Lichtreflexionen bzw. Spiegelungen sowie
- Veränderung des Mikroklimas durch Aufheizung der Module sowie Reduzierung des auftreffenden Niederschlags unterhalb der Module.

Um nachhaltige Beeinträchtigungen der Umwelt zu vermeiden bzw. so gering wie möglich zu halten, ist der zukünftige Anlagenstandort sorgfältig auszuwählen. Grundsätzlich sind Flächen zu wählen, die eine hohe Vorbelastung und somit ein geringe Empfindlichkeit gegenüber Eingriffen aufweisen. Als solche Vorbelastung kommen in Frage:

- wesentliche Beeinträchtigung der Biotop-, Biotopverbund- und Habitatfunktion (z.B. durch Lärm),
- starke Belastung der Bodenfunktion (z.B. durch Versiegelung, Bodenverdichtung oder Kontamination),
- erheblich verfremdetes Landschaftsbild durch Bebauung oder andere technische Objekte wie Verkehrswege.

Flächen mit einem geringem Konfliktpotenzial (Beispiel siehe Tabelle 3) werden als Eignungsbereiche für Photovoltaik-Freiflächenanlagen bezeichnet.

Tabelle 3: Eignungsbereich bzw. Flächen mit geringem Konfliktpotenzial

Lage der Flächen	Eignungsbereich
im Innenbereich	<ul style="list-style-type: none">• Siedlungsbrachen (sofern nicht für höherrangige Nutzungen im Zuge der Innenentwicklung nutzbar)• versiegelte Flächen (z.B. Stellplätze), gesicherte Altlasten• Gewerbe- und Industriegebiete
im Außenbereich	<ul style="list-style-type: none">• Standorte, die eine Vorbelastung mit großflächigen technischen Einrichtungen im räumlichen Zusammenhang aufweisen• Pufferzonen entlang großer Verkehrsstrassen, Lärmschutzeinrichtungen• Abfalldeponien und Halden• Konversionsflächen mit hohem Versiegelungsgrad ohne besondere ökologische oder ästhetische Funktion• sonstige brachliegende ehemals baulich genutzte Flächen

Quelle: [BMU 2007]

Damit die Solarenergie flächensparend sowie natur- und landschaftsverträglich genutzt wird, wurden u.a. in Mecklenburg-Vorpommern raumplanerische Grundsätze für die Planung von PV-Vorhaben erarbeitet. [PV-M-V 2010] Es gilt z.B., dass Photovoltaik-Anlagen vorrangig an bzw. auf vorhandenen Gebäuden und baulichen Anlagen errichtet werden sollen. Photovoltaik-Freiflächenanlagen sollen insbesondere auf bereits versiegelten oder geeigneten wirtschaftlichen oder militärischen Konversionsflächen errichtet werden.

Diese Grundsätze werden durch den Gesetzgeber auch mithilfe finanzieller Anreize (EEG-Vergütung) unterstützt. Abgesehen von der grundsätzlich zu bevorzugenden Nutzung von Dachflächen, Fassaden oder anderen baulichen Anlagen sieht das EEG eine Einspeisevergütung nur für Photovoltaik-Freiflächenanlagen vor, die

- auf Konversionsflächen aus wirtschaftlicher, verkehrlicher, wohnungsbaulicher oder militärischer Nutzung,
- entlang von Autobahnen und Schienenwegen sowie
- in einem spätestens seit dem 01.01.2010 ausgewiesenen Gewerbe- oder Industriegebiet installiert wurden.

Zusätzlich zur Vorgabe von Standortprioritäten für die Errichtung und den Betrieb von Photovoltaik-Anlagen, werden vom Gesetzgeber bedeutende Flächen von dieser Nutzung ausgeschlossen. Folgende Gebiete gelten u.a. in Mecklenburg-Vorpommern als Ausschlussgebiete für Photovoltaik-Freiflächenanlagen

- Vorranggebiete laut LEP oder RREP, z.B. Windeignungsgebiete, landesweit und regional bedeutsame gewerbliche und industrielle Großstandorte, Tourismusschwerpunkträume außerhalb bebauter Ortslagen,
- nach Wasserhaushaltsgesetz (WHG) festgesetzte oder vorläufig gesicherte Überschwemmungsgebiete,
- Flächen zum Schutz bestimmter Teile von Natur und Landschaft (Naturmonumente, Natura 2000 Gebiete, Naturschutzgebiete),
- Wald im Sinne des Landeswaldgesetzes (LWaldG) einschl. der Waldabstandsflächen.

Im Einzelfall zu prüfen ob eine Photovoltaik-Freiflächenanlage keine erheblichen Beeinträchtigungen für Natur und Landschaft verursacht und damit zulässig wäre, sind folgende Gebiete

- Vorbehaltsgebiete nach LEP und RREP,
- Flächen mit hohem Landschaftsbildpotential (Stufe 4),
- unzerschnittene Freiräume (Stufe 4),
- landwirtschaftliche Flächen mit über 20 Bodenpunkten,
- hochwassergefährdete Bereiche einschl. hochwassergefährdete Küstenschutzgebiete,
- Flächen zum Schutz bestimmter Teile von Natur und Landschaft (Landschaftsschutzgebiete, gesetzlich geschützte Biotope, Flächen mit Bedeutung für

den gesetzlichen Artenschutz, Naturdenkmäler und Geschützte Landschaftsbestandteile) sowie

- Flächen, deren Bebauung zu einer möglichen Beeinträchtigung der Belange des Denkmalschutzes (Bodendenkmale, historische Parkanlagen/Gärten) führen kann.

Die Photovoltaik-Technologien sind bereits jetzt ausgereift und können einen beträchtlichen Anteil der weltweiten Stromversorgung liefern. Sie bieten ein vielfältiges und breitgefächertes Spektrum an Formen und Einsatzgebieten. Vom Parkscheinautomat über vollständig eingedeckte Hausdächer und Fassaden bis hin zu mehreren Hektar großen Solarparks können Photovoltaik-Anlagen theoretisch überall montiert werden. Die Standortwahl von Photovoltaik-Anlagen erfolgt jedoch unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien.

Zum einen muss ein potenzieller Standort einen effizienten Betrieb und damit eine gute Wirtschaftlichkeit der Anlagen garantieren. So sind z.B. flache Landschaften mit niedrig wachsender Vegetation bzw. ohne hohe Bebauung ideal für den Betrieb von Photovoltaik-Anlagen. Zum anderen sind bei der Standortwahl raumplanerische und naturschutzrechtliche Kriterien zu berücksichtigen. Hier gilt es den sehr raumgreifenden Photovoltaik-Ausbau zuerst auf Flächen zu lenken, die keine hohe Bedeutung für den Naturschutz oder für die regionale Wirtschaft besitzen.

Parameter des technischen Potenzials der Photovoltaik

Das technisch nutzbare Potenzial der Geothermie wird vor allem von folgenden Parametern beeinflusst:

- Leistungsfähigkeit der technischen Anlagen (Wirkungsgrad, Performance Ratio), abhängig von
 - eingesetzte Modultechnologie (kristallin, amorph)
 - Modulausrichtung
 - Degradation
 - Lufttemperatur
 - Bewölkung
- energiewirtschaftliche Standortplanung
 - an Gebäuden, auf Freiland
 - nutzbare Flächen abzgl. Verschattung
- rechtliche Standortplanung
 - Bundesbaugesetz (BauG), Landesbaugesetze (LBauG)
 - Raumordnungsgesetz (ROG)
 - Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG)

2.3 Das wirtschaftliche Potenzial der Photovoltaik

Wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit bzw. auf das wirtschaftliche Potenzial von Photovoltaik-Anlagen haben die Kosten und Einnahmen, die durch Errichtung und Betrieb der Anlage entstehen. Wenn die laufenden Kosten, die eine Photovoltaik-Anlage verursacht, niedriger als die durch sie erzielten Einnahmen sind, spricht man von einem rentablen Betrieb der Anlage.

Sobald die Investitionskosten einer Photovoltaik-Anlage durch die durch sie entstehenden Einnahmen gedeckt wurden, spricht man davon, dass sich die Anlage finanziell amortisiert hat. Neben der finanziellen gibt es aber auch die energetische Amortisationszeit. Das ist die Dauer, die die Photovoltaik-Anlage benötigt, um genauso viel Energie abzugeben, wie bei ihrem Bau benötigt wurde. Durchschnittlich beträgt die energetische Amortisation einer gesamten Solaranlage mit all ihren Komponenten, je nach Technologie und Standort in Deutschland zwischen rund drei und sechs Jahren.

Die Rentabilität [%] ist eine wichtige Kennzahl für die Wirtschaftlichkeit einer Photovoltaik-Anlage. Um die Wirtschaftlichkeit bzw. die Wettbewerbsfähigkeit von Photovoltaik mit anderen Stromerzeugungsarten vergleichen zu können, wird der Begriff der Stromgestehungskosten verwendet. Als Stromgestehungskosten werden die Kosten bezeichnet, welche für die Energieumwandlung von einer anderen Energieform in elektrischen Strom notwendig sind. Sie werden in der Regel in Euro je Megawattstunde [€/MWh] angegeben.

Eine Photovoltaik-Anlage rentiert sich für den Betreiber, wenn die Stromgestehungskosten für den durch die Anlage produzierten Solarstrom geringer sind als

1. die EEG-Vergütung, die er dafür bekommen würde oder
2. die Preise, die er für herkömmlichen Strom zahlen müsste.

Bei Eigenverbrauch spart der Betreiber dann die Differenz. Zusätzlich bekommen seit Anfang 2010 Betreiber einer Photovoltaik-Anlage für den Eigenverbrauch oder den Verbrauch durch Dritte in unmittelbarer räumlicher Nähe eine EEG-Eigenverbrauchsvergütung. Diese Regelung wird ab dem 01.01.2014 entfallen. [BMU 2012b]

Welche Form der Vergütung die rentabelste ist, variiert von Fall zu Fall. So kann der Eigenverbrauch von Vorteil sein, wenn einerseits der Preis für den herkömmlichen Haushaltsstrom und andererseits der eigene Strombedarf relativ hoch ist. Bei geringem Eigenbedarf und moderaten Preisen für den Haushaltsstrom bietet die Volleispeisung einen größeren finanziellen Vorteil.

Die Höhe der Stromgestehungskosten ist abhängig von den Kosten für die Photovoltaik-Anlage sowie vom erbrachten Stromertrag, welcher wiederum von der Leistungsfähigkeit der Anlagen und den projektspezifischen Standortbedingungen abhängt. Je höher der Stromertrag und je niedriger die Kosten sind, desto geringer fallen die Stromgestehungskosten aus. Auch die Dauer der finanziellen Amortisation hängt von diesen Faktoren ab. Hier gilt je höher der Gewinn durch den Stromertrag und je niedriger die Kosten für die Anlage sind, desto kürzer dauert die Amortisationszeit.

2.3.1 Kosten

Die Investitionskosten einer Photovoltaik-Anlage hängen von vielen Faktoren wie eingesetzte Modultechnologie, Anlagenart, statische Maßnahmen usw. ab. Hauptsächlich richten sie sich aber nach der Qualität und Leistungsstärke der Anlagen. Je kWp installierter Leistung beträgt der Endkundenpreis derzeit durchschnittlich 1.776 € (s. Abbildung 7). Der Endkundenpreis pro kWp beinhaltet eine schlüsselfertige Photovoltaik-Anlage inklusive Module, Wechselrichter, Montagegestell, elektrische Verkabelung, Planung und Installation.

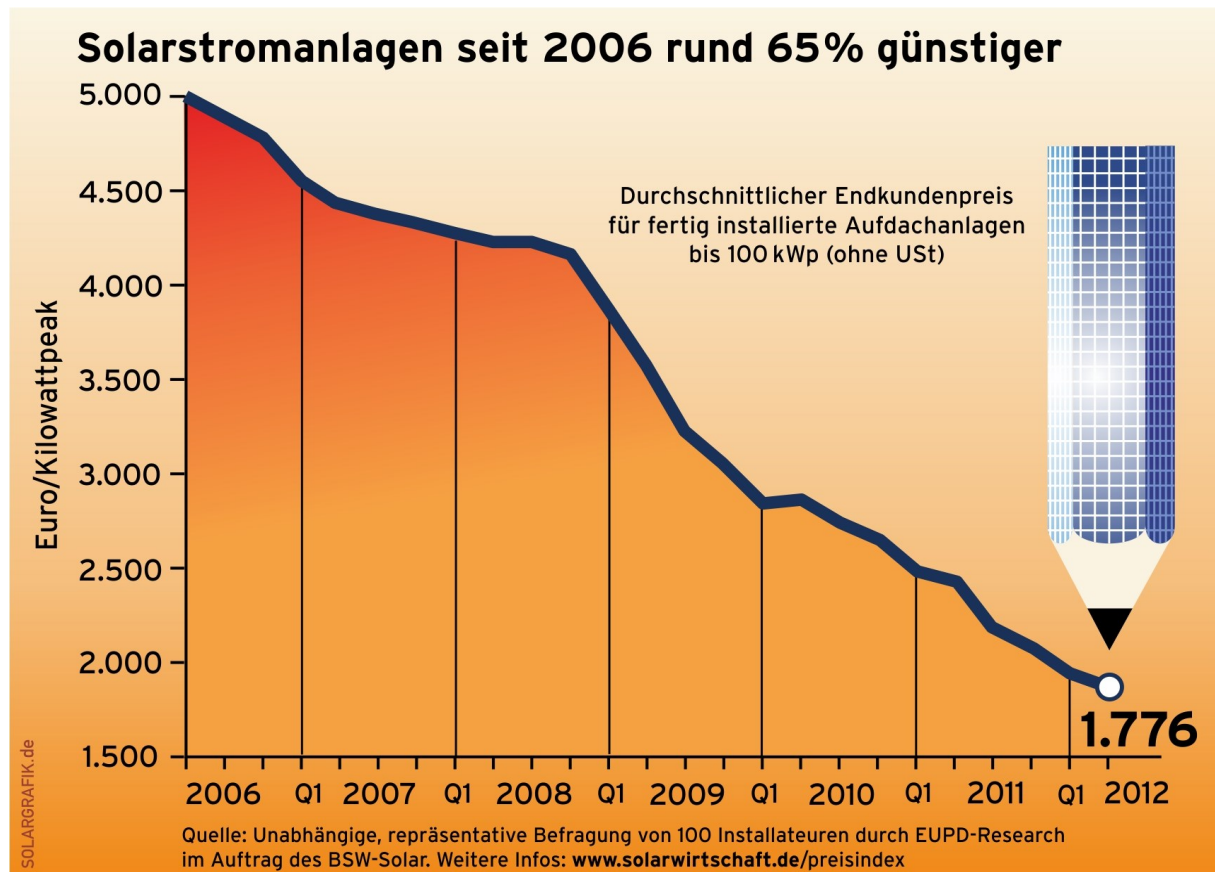


Abbildung 7: Entwicklung Endkundenpreis für Photovoltaik-Anlage 2006 bis 2012 [BSW]

Die jährlichen Nebenkosten für Photovoltaik-Anlage ergeben sich hauptsächlich aus den anfallenden Kosten für Wartung und Instandhaltung, Reparaturen, Versicherungszahlungen Finanzierungskosten, Steuern usw.. Für eine Betriebsdauer von 20 Jahren hochgerechnet, belaufen sich die jährlichen Neben- bzw. Betriebskosten auf ca. 1,3 – 1,5% der gesamten Investitionskosten. [Fraunhofer 2012a]

Für einen reibungslosen Betrieb empfiehlt sich die regelmäßige Überprüfung der Photovoltaik-Anlage durch einen Wartungsfachmann. Dennoch kann es bei Photovoltaik-Anlage n, wie bei jeder anderen Technik, zu Betriebsausfällen kommen. So ist z.B. die Störung oder der Ausfall des Wechselrichters eine Fehlerquelle bei einer Photovoltaik-Anlage. Dieses Gerät reagiert sensibel auf Hitze, Staub oder Feuchtigkeit ebenso wie auf Spannungs- oder Stromschwankungen aus dem eigenen Haushalt oder anderen Störungsquellen wie zum Beispiel nahe gelegene Starkstromanlagen. Die durchschnittliche Lebensdauer von Wechselrichtern beträgt rund 10 bis 14 Jahre. Während der angestrebten

Betriebszeit der Photovoltaik-Anlage von 20 bis 25 Jahren ist also damit zu rechnen, das Wechselrichter ca. ein bis zweimal ausgetauscht werden müssen. Gegen einen Aufpreis bieten einige Hersteller eine Verlängerung der Garantiezeit auf bis zu 25 Jahre an was die Ersatzkosten bei Ausfall des Wechselrichters in Grenzen hält.

Generell sollten Anlagenbetreiber sich gegen Schäden, die an und durch die Photovoltaik-Anlage entstehen können sowie gegen erhebliche Ertragsverluste versichern. Eine Haftpflichtversicherung eignet sich für Schäden, die durch eine Photovoltaik-Anlage an Dritten entstehen können, abzusichern. Integriert in die Wohngebäudeversicherung sind sogenannte Elementarschäden an kleineren Dach- bzw. Fassadenanlagen mit abgedeckt. Elementarschäden entstehen z.B. durch Hagel, Feuer, Sturm oder Blitzeinschlag. Eine nahezu Rundumversicherung bieten spezielle Photovoltaik-Versicherungen. Auf Grundlage einer Elektronikversicherung wird der Versicherungsschutz durch besondere Bedingungen, Vereinbarungen oder Klauseln auf die speziellen Anforderungen einer Photovoltaik-Anlage angepasst. Die Photovoltaik-Versicherungen beinhalten eine Allgefahrendeckung. Das heißt, dass alles versichert ist, sofern es nicht ausgeschlossen ist (z.B. Naturkatastrophen, Krieg). Eine solche Versicherung bietet je nach Wunsch Versicherungsschutz gegen Ertragsverlust, Beschädigungen oder Zerstörungen (Sachschaden) u.a. durch

- Bedienungsfehler,
- Überspannung oder Kurzschluss,
- Feuer,
- Vorsatz Dritter (z.B. Diebstahl, Vandalismus),
- Konstruktions- oder Materialfehler,
- Naturereignisse wie z.B. Sturm, Blitz, Hagel, Schneedruck, Frost oder Marderbiss.

Hinsichtlich der Prämien, der Vertragsausschlüsse und des geforderten Selbstbehalts unterscheiden sich die einzelnen Anbieter teils deutlich, so dass allgemeine Empfehlungen hier nicht möglich sind, sondern individuelle Angebote eingeholt werden sollten.

Die Finanzierung der meisten privaten Solaranlagen erfolgt über einen Kredit bei der Hausbank. Kredite sind oftmals günstiger als die Barbezahlung einer Photovoltaik-Anlage. Da die staatliche Einspeisevergütung über das EEG eine Sicherheit ist, finanzieren viele Banken eine Photovoltaik-Anlage zu 100%, ohne Eigenkapital wie es sonst bei einer Hausfinanzierung üblich ist. Die Zinssätze für Photovoltaik-Finanzierung lagen im Jahr 2012 bei rund 4% (kleine Photovoltaik-Anlage) bis 4,5% (große Photovoltaik-Anlage). [Fraunhofer 2012a] Als Sicherheit vereinbaren die Kreditinstitute bei kleineren Photovoltaik-Anlagen meist die Abtretung der Einspeisevergütung. Bei größeren Kreditsummen ab ca. 50.000 € müssen die Antragsteller eine hohe Bonität vorweisen können oder die Banken verlangen einen Grundbucheintrag zur Sicherheit der Finanzierung.

Die Höhe der Finanzierungskosten hat einen erheblichen Einfluss auf die Stromgestehungskosten und die Wettbewerbsfähigkeit der Photovoltaik. Viele Kreditinstitute bieten darum spezielle Photovoltaik-Kredite an. Der Klassiker der Solaranlagenfinanzierung ist der zinsgünstige Kredit der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW), der schon Solaranlagen seit 1999 über das 100.000-Dächer-Programm mit Bundesmitteln unterstützte. Aber auch umweltorientierte Kreditinstitute wie die Umweltbank AG oder Direktbanken wie die Deutsche Kreditbank AG (DKB) bieten Kredite zur Finanzierung erneuerbarer Energietechnik zu

vergünstigten Bedingungen an. Stellenweise bezuschussen auch Bundesländer oder Energieversorger Betreiber kleinerer Photovoltaik-Anlagen. Dies ist aber eher die Ausnahme.

2.3.2 Einnahmen

Der wichtigste Faktor für die Wirtschaftlichkeit einer Photovoltaik-Anlage ist eine hohe Anzahl der erzeugten Kilowattstunden Solarstrom pro Kilowatt installierter Leistung. Anders gesagt, ist eine möglichst hohe Anzahl erbrachter Vollaststunden erwünscht. Vollaststunden sind die Stunden, in denen die Photovoltaik-Anlage ihre maximale Leistung aufgrund optimaler Einstrahlungsbedingungen erbringen kann. Dagegen sind Teillaststunden die Stunden, in denen die Photovoltaik-Anlage nur einen Teil der theoretisch maximal möglichen Leistung erbringen kann. Dies ist z.B. der Fall, wenn durch Bewölkung keine direkte Einstrahlung auf die Solarmodule erfolgen kann.

Voraussetzungen für eine bestmögliche Ausnutzung des vorhandenen Strahlungsangebots sind

- die optimale Ausrichtung / Neigung der Solarmodule,
- Verschattungsfreiheit,
- eine moderne Anlage nach Stand der Technik sowie
- ein störungsfreier Betrieb der Photovoltaik-Anlage.

Die Vergütung des Solarstroms wird durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) geregelt. Die Betreiber einer Photovoltaik-Anlage erhalten für einen Zeitraum von 20 Jahren ab Inbetriebnahme der Photovoltaik-Anlage für jede Kilowattstunde Strom, die sie ins öffentliche Netz einspeisen oder selbst verbrauchen, eine im EEG festgelegte Vergütung.

Tabelle 4: Vergütungssätze für eingespeisten Strom aus PV-Anlagen ab dem 01.04.2012

PV-Anlagenart	Größenbegrenzung	Vergütungsklasse
Gebäude	bis 30 kWh	19,5 ct/kWh
	> 40 kWh	18,5 ct/kWh
	> 100 kWh	16,5 ct/kWh
	> 1.000 kWh	13,5 ct/kWh
Freiflächenanlagen	bis 10 MW	13,5 ct/kWh

Quelle: BMU, Informationen zur Novellierung des EEG 2012 durch die PV-Novelle, Stand 24.08.2012

Die Vergütungssätze werden ab dem 1. Mai 2012 monatlich um 1% gegenüber dem jeweiligen Vormonat abgesenkt. Dies entspricht einer jährlichen Absenkung von ca. 11,4% (Basisdegression), wenn der Zubaukorridor eingehalten wird. Je nach Höhe des Zubaus werden die Degressionsschritte alle drei Monate angepasst und in Monatsschritten umgesetzt. Das kann einerseits dazu führen, dass mit sinkendem Zubau auch die Degression verringert wird. Andererseits erhöht sich die Degression mit jedem Megawatt zusätzlich installierter Photovoltaik-Leistung über den angezielten jährlichen 3.500 MW.

Für Anlagen zwischen 10 und 1.000 kW, die ab dem 1. April 2012 in Betrieb genommen wurden und werden, wird ab dem 1. Januar 2014 pro Jahr nur noch 90% der gesamten erzeugten Strommenge vergütet. Das heißt für den Zeitraum bis 31. Dezember 2013 erhalten diese Anlagen noch die Vergütung für 100% der erzeugten Strommenge. Bei kleinen Anlagen bis 10 kW und bei Freiflächenanlagen und sonstigen Anlagen bis 10 MW erfolgt die Vergütung weiterhin zu 100% der erzeugten Strommenge. Die unvergütete Strommenge kann selbst verbraucht, direkt vermarktet oder dem Netzbetreiber zum Verkauf an der Börse angedient werden. Der Eigenverbrauchsbonus entfällt.

Die Photovoltaik-Branche entwickelt sich sehr dynamisch und genauso werden sich die EEG-Vergütungssätze anpassen. Ziel sollte es sein, dass sich Solarstrom in Zukunft auch ohne Fördergelder rentiert. Die EEG-Vergütung ist für Anlagen, die jetzt in Betrieb genommen werden für die Dauer von 20 Jahren garantiert. Bei qualitativ hochwertigen Komponenten der Photovoltaik-Anlagen kann ihre Lebensdauer durchaus 25 bis 35 Jahre erreichen. Anlagenbetreiber, die ihre Photovoltaik-Anlage auch nach Ablauf der EEG-Vergütung weiter zur Stromerzeugung nutzen wollen, können den Strom entweder weiterhin ins Netz einspeisen und zu Marktpreisen verkaufen oder aber selbst verbrauchen. Da nach Ablauf der 20-jährigen Abnahmegarantie durch das EEG der am freien Markt erzielbare Preis für den erzeugten Strom deutlich unter den Bezugskosten für Haushaltsstrom liegen dürfte, ist ein möglichst hoher Eigenverbrauch unter finanziellen Gesichtspunkten vorzuziehen.

Parameter des wirtschaftlichen Potenzials der Photovoltaik

Das wirtschaftliche Potenzial der Photovoltaik wird vor allem von folgenden Parametern beeinflusst:

- Kosten
 - Investitionskosten
 - Nebenkosten (Wartung, Instandhaltung, Reparaturen, Versicherungszahlungen, Finanzierungskosten, Gewinnertragssteuern)
- Einnahmen
 - Fördertarife
 - Energieverkauf
 - Eigenverbrauch

3 Klima und Klimawandel

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) definiert das Klima als die Zusammenfassung aller Wettererscheinungen, die den durchschnittlichen Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort bzw. in einer Region charakterisieren. Es wird repräsentiert durch die statistischen Gesamteigenschaften (Mittelwerte, Extremwerte, Häufigkeiten, Andauerwerte u.a.) von Wetterelementen über einen genügend langen Zeitraum (ca. 30 Jahre). Als Wetter- oder auch Klimaelemente gelten u.a. die physikalischen Parameter Lufttemperatur, -feuchtigkeit und Luftdruck, solare Strahlung, Niederschlag, Windgeschwindigkeit und Bewölkung. Die Mittelwerte der Klimaelemente aus dem Zeitraum 1961 – 1990 werden als "Normalwerte" bezeichnet. Dieser Zeitraum wurde von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) als international gültige Referenzperiode festgelegt. [DWD]

Der Begriff „Klimawandel“ ist ein von den Medien unserer Zeit geprägter Begriff. Unter ihm wird die Änderung des Klimas verstanden, die direkt oder indirekt aus den Aktivitäten der Menschen, die Zusammensetzung der Erdatmosphäre verändernd, resultiert. Zusätzlich kommen die über vergleichbare Zeiträume beobachteten natürlichen Klimaschwankungen hinzu. [IPPC 2007] Der Klimawandel zeigt sich bisher in ungewöhnlich stark veränderten Durchschnittswerten und Variabilität von Klimaelementen. Am deutlichsten ist dies anhand des Anstiegs der globalen Mitteltemperatur um 0,8°C seit dem Jahr 1990 zu erkennen. Aus diesem Grund wird im Zusammenhang mit dem Klimawandel häufig auch von der globalen Erwärmung gesprochen.

Um der anthropogen verstärkten globalen Erwärmung entgegenzuwirken und potenzielle Folgen abzumildern oder zu verhindern, wurde bisher intensiv Klimaschutz (Mitigation) betrieben. Eine sehr bekannte Klimaschutzmaßnahme ist z.B. die Minderung von Treibhausgasemissionen durch die Nutzung von erneuerbaren Energien statt fossiler Energieträger. Da nach dem derzeitigen Stand wissenschaftlicher Erkenntnisse der Klimawandel nicht mehr aufzuhalten ist, sind Maßnahmen zur Anpassung (Adaption) notwendig um die Schäden für die natürlichen und anthropogenen Systeme so gering wie möglich zu halten. Für die Entwicklung und Durchführung entsprechender Anpassungsmaßnahmen müssen die zu erwartenden Klimafolgen und ihre Auswirkungen auf wichtige Bereiche wie die Wasserwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft, Küsten- und Hochwasserschutz, Biodiversität und Naturschutz, Gesundheit, Energie etc. bekannt sein.

Welche Klimaveränderungen und deren Folgen uns in Zukunft noch erwarten, versucht man mittels einer Vielzahl an Bemessungen, Berechnungen und Klimamodellierungen (z.B. REMO, WETTREG) herauszufinden. Jedoch sind nahezu alle bisherigen Prognosen über die zukünftige Entwicklung des Klimas mit großen Unsicherheiten behaftet. Diese Unsicherheiten resultieren zum einen aus der begrenzten Kenntnis über das Klimasystem sowie der externen Einflussfaktoren auf das Klima. Zum anderen sind sie in den Defiziten von Klimamodellen begründet.

Trotz dieser Unsicherheiten lassen sich auf der Grundlage bisheriger Erfahrungen sowie der gegenwärtigen Klimasituation jedoch u.a. folgende Tendenzen des Klimawandels erkennen und ableiten:

- ansteigende Temperaturen der erdnahen Atmosphäre sowie der Meere bzw. Oberflächengewässer

- veränderte Niederschlagsverhältnisse (langfristig abnehmender Trend bei Sommerniederschlägen; zunehmende Winterniederschläge)
- Anstieg des Meeresspiegels u.a. aufgrund schmelzender Gletscher und Eisschilde
- häufigere und intensivere Extremwetterereignisse (High-Impact-Weather) z.B. Starkregenereignisse, Hitzewellen, Tornados etc.

3.1 Klima und Klimawandel an der deutschen Ostseeküste

Das Gesamtgebiet von Deutschland gehört zum warm-gemäßigten Regenklimate der mittleren Breiten. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 8,2°C und die durchschnittliche Sonnenscheindauer 1.528 Stunden im Jahr. Die überwiegend westlichen Winde bringen ganzjährig feuchte Luftmassen vom Atlantik heran und damit Niederschlagsmengen bis zu 789 l/m² im Jahr. Der ozeanische Einfluss sorgt in der Regel für milde Winter und nicht zu heiße Sommer. Das Klima in Mecklenburg-Vorpommern ist sehr kontinental geprägt. Im Landesinneren herrschen relativ große Temperaturunterschiede zwischen Winter und Sommer. An der Küste ist der Jahresgang der Temperaturen hingegen gedämpft, wobei die Temperaturminima und -maxima verzögert sind. Das Klima in Schleswig-Holstein ist auf Grund der Lage zwischen Nord- und Ostsee stark ozeanisch geprägt mit relativ geringen Temperaturjahresgängen. Die Temperaturminima und -maxima treten verhältnismäßig spät auf. Die Niederschlagsmengen sind sehr hoch. Vor allem im Herbst sorgen die warmen Meeresflächen für kräftigen Feuchtenachschub und entsprechende Regenfälle.

Hinsichtlich der vorherrschenden Temperaturen liegt die Ostseeküste im bundesweiten Mittelfeld. Allerdings gehört die Ostseeküste zu den sonnenreichsten Gegenden Deutschlands. Mit durchschnittlich 1.648 Sonnenstunden lag Mecklenburg-Vorpommern z.B. im Jahr 2009 an erster Stelle. Im Jahr 2010 war mit insgesamt 1.827 Sonnenstunden die Greifswalder Oie der sonnigste Ort in Deutschland. [DWD] Grund für die Wolkenarmut an der Ostseeküste ist zum einen die Tatsache, dass Tiefdruckgebiete meist sehr schnell über die Ostseeregion hinweg ziehen. Die in Küstengebieten durchschnittlich stärkeren Winde lassen Wolkendecken auch schnell wieder aufreißen. Zudem haben sich Regenwolken schon häufig im Westen abgeregnet. Im Winter wirkt sich die Nähe zu skandinavischen Hochdruckgebieten so aus, dass sich Wolken weiträumig auflösen. Im Sommer verdunstet aus dem kühlen Meer weniger Wasser. Deshalb bilden sich in der Ostseeregion weniger Wolken als im Binnenland.

3.1.1 Bisherige Klimaveränderungen

Wie sehr sich das Klima in Deutschland und insbesondere in M-V und S-H verändert hat, geht aus den langjährig dokumentierten Messdaten des Deutschen Wetterdienstes hervor. So ist z.B. zu erkennen, dass in der deutschen Ostseeregion die Klimaerwärmung bisher weniger stark ausgeprägt ist als in anderen Regionen Deutschlands. Mit 0,4°C ist der Temperaturanstieg in Mecklenburg-Vorpommern einer der geringsten. Der Temperaturanstieg in Schleswig-Holstein beträgt 0,8°C und liegt damit genau im Trend der weltweiten mittleren Erwärmung. Infolge der Erwärmung stieg auch die Anzahl der Sommertage sowie der tropischen Nächte. Die Anzahl der Frosttage nahm ab. Im Vergleich

zu den 1940er Jahren wurden in den letzten Jahren bis zu 10 Sommertage mehr und bis zu 20 Frosttage weniger gezählt.

Wie die Temperaturen so haben auch die durchschnittlichen Niederschlagsmengen in Deutschland zugenommen. Deutschlandweit betrug die Zunahme bisher 8%. Schleswig-Holstein liegt mit 10 bis 13% weit über dem bundesweiten Durchschnitt. In Mecklenburg-Vorpommern ist dagegen mit 1,5% eine sehr geringe Zunahme zu verzeichnen. Insgesamt nimmt der Niederschlag besonders in den Wintermonaten zu. In den Sommermonaten bleiben die Niederschläge relativ konstant oder zeigen leicht abnehmende Tendenzen. In Schleswig-Holstein ist dagegen auch im Sommer eine Zunahme an Niederschlägen zu verzeichnen.

Tabelle 5: Klimaänderungen an der deutschen Ostseeküste bis heute (2009) im Vergleich zur Referenzperiode (1961-1990)

Klimaelemente	BRD	M-V	S-H
durchschnittliche Temperatur	+0,8°C	+0,4°C	+0,8°C
absolute Niederschlagsmenge	+8%	+1,5%	+10-13%
Windverhältnisse	keine Änderungen	keine Änderungen	keine Änderungen
Sonnenscheindauer	zunehmend	zunehmend	zunehmend

Quelle: zusammengestellt aus Daten des DWD

Eine systematische Veränderung der Windverhältnisse in Deutschland bzw. an der deutschen Ostseeküste konnte bisher nicht festgestellt werden. Die Sonnenscheindauer erfährt dagegen deutschlandweit seit den 1990er Jahren einen relativ starken Aufwärtstrend. Besonders auffällig ist die sehr geringe Anzahl von Jahren ab 1990 in denen die durchschnittliche Sonnenscheindauer unter dem Referenzwert von 1960-1990 (ca. 1.520 h) liegt. [DWD 2010]

3.1.2 Mögliche Klimaänderungen bis 2100

Deutschlands Küstenregionen von Nord- und Ostsee erwarten bis zum Ende des 21. Jahrhunderts einen vergleichsweise geringen Temperaturanstieg von 2,1 bis 4,8°C. Ursache dafür ist die Nähe zum Meer und das relativ ausgeglichene und gemäßigte Küstenklima. Allerdings wird sich die Häufigkeit so genannter Temperaturkentage (Eistage, Frosttage, Sommertage, Tropennächte) zum Teil deutlich verändern. In den Sommermonaten kann es aufgrund der Erwärmung zu einem Anstieg der Sommertage um bis zu 38 Tage kommen. Ebenso steigt vermutlich die Anzahl der Tropennächte um bis zu 23 Nächte. In den Wintermonaten führt die Erwärmung an der Ostseeküste zu einem Rückgang der Frosttage um 18 bis mögliche 50 Tage.

Tabelle 6: Mögliche Änderungen der Temperatur an der deutschen Ostseeküste bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zur Referenzperiode (1961-1990)

Temperatur	Jahr			Frühling			Sommer			Herbst			Winter		
	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max
Ø Temperatur [°C]	+2,1	+3	+4,8	+1,5	+2,7	+4,6	+1,9	+3	+5,1	+2,3	+3,2	+4,7	+1,9	+3,4	+4,8
Sommertage	+7,4	+16,8	+38,3	0	+1,5	+3,5	+5,7	+12,2	+30,3	+0,9	+2,6	+5,5	0	0	0
heiße Tage	+2,1	+5,8	+14,7	+0,1	+0,3	+0,6	+1,6	+4,9	+12,7	+0,1	+0,5	+1,8	0	0	0
tropische Nächte	+1,2	+8,9	+23	0	+0,2	+0,8	+1,2	+7,8	+19,1	+0,1	+0,9	+3,1	0	0	0
Frosttage	-17,9	-34,5	-50,1	-3,5	-7,4	-11,8	0	0	0	-1,3	-3,8	-6,1	-12,3	-24,5	-33,2
Eistage	-8,1	-15,6	-24	-0,6	-1,7	-2,9	0	0	0	-0,1	-0,9	-1,8	-6,9	-12,7	-21

Quelle: zusammengestellt aus Daten des Norddeutschen Klimabüros, Stand05/ 2011

Laut Klimaberechnungen werden die jährlichen Niederschlagsmengen an der Ostseeküste um bis zu 14% zunehmen. Insbesondere in den Wintermonaten werden die Niederschläge um 15 bis zu 64% intensiver. Eine starke Abnahme um bis zu 38% ist dagegen bei den sommerlichen Niederschlägen zu erwarten. In deren Folge wird mit zunehmend außergewöhnlichen Trockenheiten in den Frühjahrs- und Sommermonaten zu rechnen sein.

Tabelle 7: Mögliche Änderungen des Niederschlags an der deutschen Ostseeküste bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zur Referenzperiode (1961-1990)

Niederschlag	Jahr			Frühling			Sommer			Herbst			Winter		
	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max
Regen [%]	0	+7	+14	+1	+12	+27	-6	-17	-38	-2	+8	+19	+15	+30	+64
Regentage	-12,1	-3	+3,3	-1,6	+1,1	+5	-2,3	-7,9	-17,2	-4,3	-0,6	+1,5	+1,5	+4,5	+8,1
Schnee [%]	-61	-82	-92	-35	-72	-98	0	0	0	-9	-67	-96	-64	-83	-96
Schneetage	-0,2	-3,1	-4,8	-0,1	-0,5	-0,7	0	0	0	-0,2	-0,1	0	-0,1	-2,4	-3,9

Quelle: zusammengestellt aus Daten des Norddeutschen Klimabüros, Stand05/ 2011

Tabelle 8: Mögliche Änderungen der Luftfeuchte an der deutschen Ostseeküste bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zur Referenzperiode (1961-1990)

Luftfeuchte	Jahr			Frühling			Sommer			Herbst			Winter		
	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max
relative Luftfeuchte [%]	-1	0	+1	+1	+1	+2	-2	-1	+1	-1	0	0	-2	-1	+1
bodennaher Wasserdampfgehalt [%]	+17	+22	+26	+16	+20	+25	+14	+19	+22	+18	+23	+29	+19	+28	+30

Quelle: zusammengestellt aus Daten des Norddeutschen Klimabüros, Stand05/ 2011

Seit Aufzeichnung der Wetterdaten sind für die Windverhältnisse in Deutschlands Küstenregionen keine systematischen Veränderungen zu erkennen. Trotzdem ist es laut Klimaberechnungen möglich, dass vor allem im Winter die durchschnittlichen

Windgeschwindigkeiten um bis zu 15% und damit auch die Sturmstärken bis zu 14% zunehmen können. Die Anzahl der Sturmtage bleibt dagegen relativ stabil.

Tabelle 9: Mögliche Änderungen der Windverhältnisse an der deutschen Ostseeküste bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zur Referenzperiode (1961-1990)

Wind	Jahr			Frühling			Sommer			Herbst			Winter		
	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max
mittlere Windgeschwindigkeit [%]	+1	+2	+4	+1	+2	+6	-10	-1	+2	-2	+2	+4	0	+5	+15
Sturmintensität [%]	0	+2	+4	-2	+2	+5	-8	-1	+2	-3	+2	+5	0	+5	+14
Sturmtage	+2,2	+3	+4,6	-0,1	+0,2	+0,6	-0,3	0	+0,6	+0,7	+1,3	+2,1	+0,5	+1,5	+3
windstille Tage	-0,2	-0,6	-1,3	-0,2	-0,4	-0,7	-0,2	+0,1	+0,3	-0,3	-0,1	0	-0,5	-0,3	0

Quelle: zusammengestellt aus Daten des Norddeutschen Klimabüros, Stand05/ 2011

Die jährlich durchschnittliche Sonnenscheindauer wird im Vergleich zu heute (1961-1990) bis Ende des 21. Jahrhunderts generell um 5 bis 7% abnehmen. Hauptsächlich infolge zunehmender Bewölkung ist vorwiegend in den Wintermonaten mit bis zu 27% weniger Sonnenstunden zu rechnen.

Tabelle 10: Mögliche Änderungen der Bewölkung an der deutschen Ostseeküste bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zur Referenzperiode (1961-1990)

Bewölkung	Jahr			Frühling			Sommer			Herbst			Winter		
	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max
Sonnenscheindauer [%]	-5	-6	-7	-8	-14	-16	-5	0	+6	-4	-3	0	-12	-20	-27
Bedeckungsgrad [%]	-6	0	+2	-5	+1	+4	-13	-5	+1	-5	-1	+1	-1	+1	+5

Quelle: zusammengestellt aus Daten des Norddeutschen Klimabüros, Stand05/ 2011

4 Entwicklung der Potenziale der Photovoltaik unter dem Einfluss des Klimawandels

Im Kapitel 2 wurden die Parameter mit Einfluss auf die Potenziale der Photovoltaik kurz erläutert. In der folgenden Tabelle 11 werden die Parameter noch einmal sowohl den Potenzialdefinitionen als auch nach Themenbereichen zugeordnet. Wie sich diese Parameter unter dem Einfluss des Klimawandels verhalten könnten, wird in diesem Kapitel betrachtet. Ziel ist es mögliche Entwicklungsperspektiven der Potenziale der erneuerbaren Energien unter dem Einfluss des Klimawandels aufzuzeigen. Dabei werden im Folgenden Thesen aufgestellt, die auf der Interpretation vorhandener Daten und bekannter Zusammenhänge basieren. Die Auflistung der Thesen erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie sollen vor allem als Anstöße zu Diskussionen und evtl. tiefergehenden Forschungen dienen.

Tabelle 11: Parameter mit Einfluss auf die Potenziale der Photovoltaik

	Kategorie	Parameter
natürliches Potenzial	Natur	<ul style="list-style-type: none"> Globalstrahlung, abhängig von <ul style="list-style-type: none"> Zusammensetzung der Erdatmosphäre geografische Lage (Sonnenstand) Bewölkung bzw. Sonnenscheindauer spez. Standortbedingungen (z.B. Albedo, Landschaftselemente)
technisches Potenzial	Technik	<ul style="list-style-type: none"> Leistungsfähigkeit der technischen Anlagen (Wirkungsgrad, Performance Ratio), abhängig von <ul style="list-style-type: none"> eingesetzte Modultechnologie (kristallin, amorph) Modulausrichtung Degradation Lufttemperatur Bewölkung energiewirtschaftliche Standortplanung <ul style="list-style-type: none"> an Gebäuden, auf Freiland nutzbare Fläche abzgl. Verschattung
	Recht	<ul style="list-style-type: none"> rechtliche Standortplanung <ul style="list-style-type: none"> Bundesbaugesetz (BauG), Landesbaugesetze (LBauG) Raumordnungsgesetz (ROG) Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG)
wirtschaftliches Potenzial	Wirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> Kosten <ul style="list-style-type: none"> Investitionskosten Nebenkosten (Wartung, Instandhaltung, Reparaturen, Versicherung, Finanzierung, Steuern) Einnahmen <ul style="list-style-type: none"> Fördertarife Energieverkauf Eigenverbrauch

4.1 Einfluss des Klimawandels auf die Parameter des natürlichen Potenzials

Das natürliche Potenzial der Photovoltaik ergibt sich im Wesentlichen durch die Globalstrahlung, das heißt, durch die Höhe der auf der Erdoberfläche auftreffenden Solarstrahlung. Die Parameter, die Höhe der Globalstrahlung beeinflussen, sind in Tabelle 11 aufgelistet.

4.1.1 Globalstrahlung

Der DWD veröffentlicht bundesweite Werte der mittleren Globalstrahlung, die auf den 30-jährigen Mittelwerten aus dem Zeitraum 1981 – 2010 basieren und die "normalen", durchschnittlichen Strahlungsverhältnisse abbilden. Deutschlandweit schwanken die Globalstrahlungswerte zwischen 946 und 1.278 kWh/m². Das bundesweite Mittel beträgt 1.053 kWh/m².

Für Mecklenburg-Vorpommern beträgt die mittlere Globalstrahlung überwiegend 1.021 – 1.080 kWh/m² und für Schleswig-Holstein 961 – 1.020 kWh/m². Die relativ guten Globalstrahlungswerte in Mecklenburg-Vorpommern resultieren aus einer stärkeren Kontinentalität im Ostseeraum sowie einer geringeren konvektiven Wolkenbildung im Frühjahr und Frühsommer über dem noch kalten Wasser.

Schleswig-Holstein liegt in einer strahlungsärmeren Zone Deutschlands. Ursache für die niedrigere Einstrahlung ist hier die häufige Zufuhr von feuchten Meeres-Luftmassen, die das typisch wolkenreiche, maritime Klima Nordwest-Deutschlands prägt. Die Ausnahme bilden die strahlungsbegünstigten Nordseeinseln. [DWD 2011]

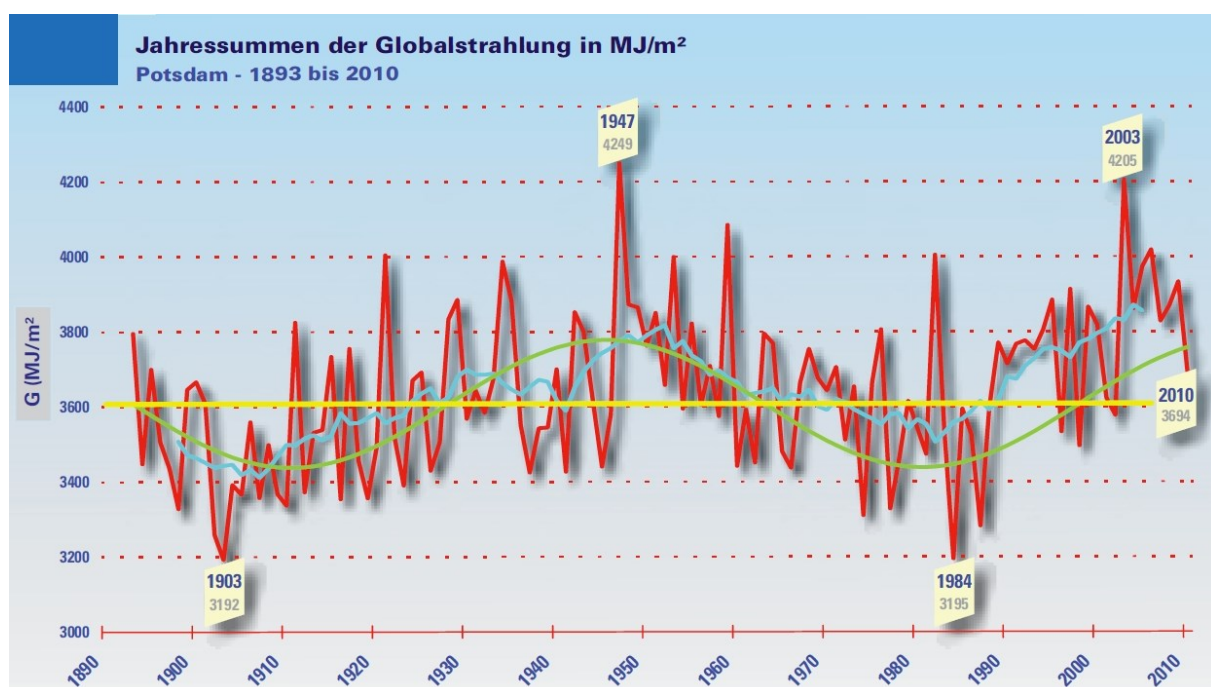


Abbildung 8: Entwicklung der Globalstrahlung (3.600 MJ = 1.000 kWh) seit 1893 am Standort Potsdam (Legende: rote Linie = Jahreswerte, gelb = Mittelwert 1901/2010, blau = gleitender 11j. Mittelwert, grün = 70j. Schwingungen) [DWD 2011]

Langjährige Messungen des Deutschen Wetterdienstes am Standort Potsdam zeigen, dass die Globalstrahlung in den letzten 120 Jahren merkbaren Schwankungen unterlag. Abbildung 8 zeigt, dass die Jahressummen der Globalstrahlung stark fluktuieren. Trotzdem ist eine periodische Schwingung der Mittelwerte über Zeiträume von 70 Jahren zu erkennen. Die durchschnittliche Schwankungsbreite beträgt $\pm 15\%$ des langjährigen Durchschnittswertes (ca. 1.026 kWh/m^2). Die Werte liegen zwischen 950 und 1.050 kWh/m^2 . Spitzenwerte wurden 1947 (1.180 kWh/m^2) und 2003 (1.168 kWh/m^2) erreicht. Die Mindestwerte lagen im Jahr 1903 und 1984 bei ca. 887 kWh/m^2 . Seit Anfang der 80er Jahre erfährt die Globalstrahlung wieder einen Aufwärtstrend, der, vorausgesetzt der Stabilität der Schwingungsperioden, in den Jahren 2010 bis 2020 den Höhepunkt erreicht. Ab 2020 könnte demnach wieder ein Abwärtstrend der Globalstrahlung einsetzen.

Als Ursache dieser Schwankungen und Trends wird zum einen die periodische Änderung der Sonnenaktivität angenommen. Diese ist zumindest soweit erforscht, dass ihre Zyklen relativ gut berechnet werden können. Die Höhe der Globalstrahlung wird weiterhin durch den Zustand der Erdatmosphäre beeinflusst. Hier spielen Parameter wie die Dichte (Höhenlage) sowie der Grad der Trübung (Luftverschmutzung) der Atmosphäre sowie auch die jeweilig vorherrschende Witterung (Bewölkung) eine wichtige Rolle. Hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels auf die Entwicklung der Globalstrahlung können z.B. laut Deutschen Wetterdienst noch keine konkreten Aussagen getroffen werden.

Abhängig von der Entwicklung der Einflussfaktoren Luftverschmutzung, Bewölkung und Sonnenscheindauer auf die Globalstrahlung können einige Theorien zur möglichen Entwicklung der Globalstrahlung entworfen werden.

Luftverschmutzung

Die Höhe der Globalstrahlung an einem Ort wird beispielsweise durch den Grad der Luftverschmutzung beeinflusst. Je stärker die Luftverschmutzung durch Aerosole (Ruß, Feinstaub, Schwefelgase usw.) ist, desto weniger Solarstrahlung erreicht die Erdoberfläche. Die Strahlung wird durch die erhöhte Konzentration an Aerosolen gestreut und wird zur diffusen Strahlung umgewandelt bzw. zurück ins All gelenkt.

Der Zusammenhang zwischen Luftverschmutzung und Globalstrahlung bzw. globaler Erwärmung ist durch verschiedene Phänomene ausreichend bekannt. So ist die Zunahme der Globalstrahlung und damit der Lufttemperatur seit den 80/90er Jahren u.a. auch auf die Reduzierung der Luftverschmutzung durch entsprechende Maßnahmen wie der Einsatz von Luftfiltern in der Industrie und im Verkehr zurückzuführen. Unterstützt wird diese Theorie durch den umgekehrten Effekt infolge von Vulkanausbrüchen. Je nach Intensität der Vulkanausbrüche können sie Ursache von kurzfristigen regionalen Witterungsänderungen bis hin zu mehrjährigen globalen Klimaänderungen, meist in Form globaler Abkühlung, sein. Ursache ist der Ausstoß der meist schwefelhaltigen Vulkanasche in die Atmosphäre. Die Solarstrahlung wird vermehrt ins All reflektiert. Zudem bilden sich durch die Aerosole vermehrt Wolken, die noch mehr Licht abschirmen, mehr Niederschläge verursachen und zu Temperaturabnahmen führen.

Als Folge des Klimawandels bzw. der durch ihn intensivierten Maßnahmen zur Reinhaltung der Luft und Atmosphäre, könnte theoretisch von einer zukünftigen Steigerung der Globalstrahlung ausgegangen werden. Allerdings sind zum einen die Potenziale zur

Luftreinhaltung in den Industrieländern nahezu ausgereizt und andererseits bemühen sich nicht alle Länder der Erde, vor allem sind hier die aufstrebenden Entwicklungsländer wie China und Indien zu nennen, um eine Reduzierung der Luftverschmutzung. In naher Zukunft ist nicht mit einer globalen Reduzierung der Luftverschmutzung und damit mit einer Steigerung der Globalstrahlung zu rechnen.

Bewölkung

Ebenso wie die Luftverschmutzung bewirkt die natürliche Bewölkung eine Abschwächung der Globalstrahlung. Die Bildung von Wolken wird wie oben erwähnt auch durch den Grad der Luftverschmutzung beeinflusst. Wie sich die Bewölkung durch den Klimawandel entwickeln wird, versuchen Forscher mittels Klimamodellierungen zu prognostizieren. Das Norddeutsche Klimabüro gibt folgendes Statement zur Entwicklung der Bewölkung für den deutschen Ostseeraum an:

„Nach dem aktuellen Stand der Forschung ist die Änderung des Bedeckungsgrades bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Jahresmittel im Vergleich zu heute (1961-1990) unklar. Einige Modelle zeigen eine Zu-, andere eine Abnahme.“

Das gleiche gilt auch für die Entwicklung des Bedeckungsgrades bis Mitte (2031-2060) des 21. Jahrhunderts (2071-2100). Folgende Grafiken sowie Tabelle 12 stellen noch einmal die aktuellen Daten zur möglichen Änderung des Bedeckungsgrades dar.

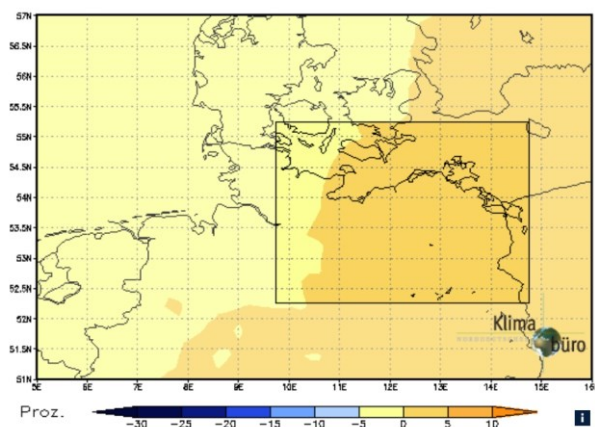


Abbildung 9: mögliche mittlere Änderung des Bedeckungsgrades bis 2050 im Vgl. zu 1961/1990 [Norddeutscher Klimaatlas 08/2012]

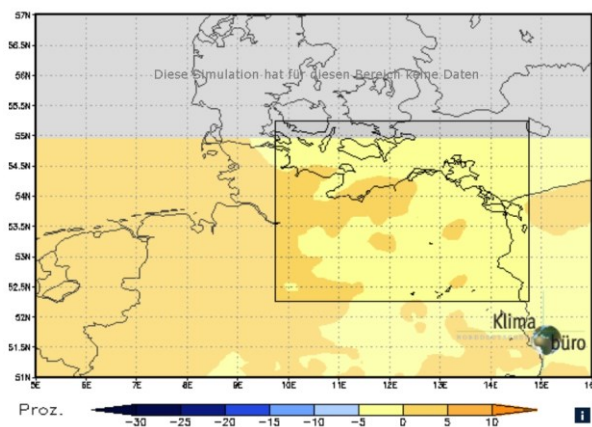


Abbildung 10: mögliche mittlere Änderung des Bedeckungsgrades bis 2100 im Vgl. zu 1961/1990 [Norddeutscher Klimaatlas 08/2012]

Tabelle 12: mögliche Änderungen des Bedeckungsgrades in [%] im Vgl. zu 1961/1990

Zeitraum	Jahr			Frühling			Sommer			Herbst			Winter		
	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max
2031-2060	-1	0	+1	-1	+1	+2	-2	0	+2	-1	0	+1	-2	+2	+4
2071-2100	-6	0	+2	-5	+1	+4	-13	-5	+1	-5	-1	+1	-1	+1	+5

Quelle: zusammengestellt aus Daten des Norddeutschen Klimaatlas, Stand 08/2012

Eine gravierende Zu- oder Abnahme des Bedeckungsgrades wird aus den Daten des Norddeutschen Klimaatlasses nicht ersichtlich. Folglich kann keine Änderung der Globalstrahlung aufgrund veränderter Bewölkungsverhältnisse angenommen werden.

Sonnenscheindauer

Für die Photovoltaik gilt grundsätzlich: Je mehr Sonne scheint, desto höher ist der Solarstromertrag!

Die Sonnenscheindauer, also die Dauer in der die Strahlungsleistung mindestens 120 W/m^2 beträgt (siehe Kapitel 2.1), liegt in Deutschland jährlich zwischen 1.300 bis 1.900 Stunden. Als bundesweites Gebietsmittel für 2010 ergab sich zum Beispiel eine Sonnenscheindauer von 1538,2 Stunden. Das sind 9,8 Stunden oder 0,6 Prozent mehr als in der Referenzperiode von 1960 bis 1990. [DWD]

Die deutsche Ostseeregion ist eine relativ sonnenreiche Gegend. Mit durchschnittlich 1.648 Sonnenstunden lag Mecklenburg-Vorpommern im Jahr 2009 bundesweit an erster Stelle. Im Jahr 2010 war mit insgesamt 1.827 Sonnenstunden die Greifswalder Oie der sonnigste Ort in Deutschland. [DWD 2011] Die Gründe dafür wurden in Kapitel 3.1 kurz erläutert. Die folgenden Grafiken und die Tabelle 13 stellen die aktuellen Daten zur möglichen Änderung der Sonnenscheindauer in bis Mitte (2031-2060) und Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Jahresmittel im Vergleich zu heute (1961-1990) dar.

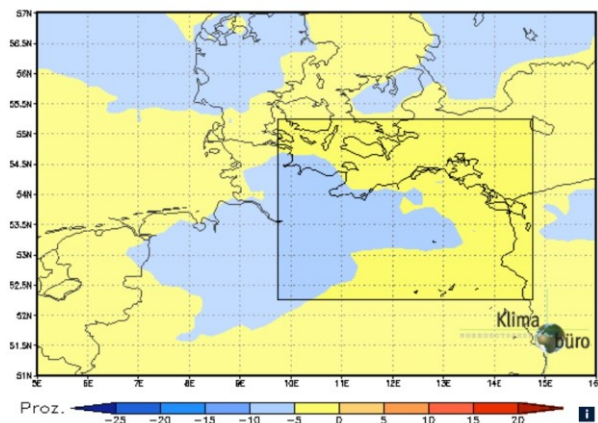


Abbildung 11: mögliche mittlere Änderung der Sonnenscheindauer bis 2031/2060 im Vgl. zu 1961/1990 [Norddeutscher Klimaatlas 08/2012]

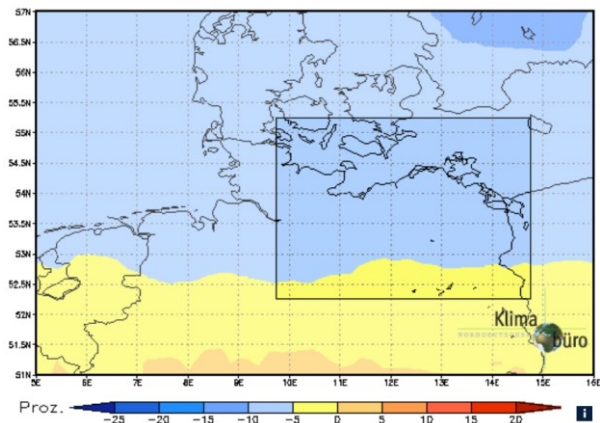


Abbildung 12: mögliche mittlere Änderung der Sonnenscheindauer bis 2071/2100 im Vgl. zu 1961/1990 [Norddeutscher Klimaatlas 08/2012]

Tabelle 13: mögliche Änderungen der Sonnenscheindauer in [%] im Vgl. zu 1961/1990

Zeitraum	Jahr			Frühling			Sommer			Herbst			Winter		
	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max
2031-2060	-4	-4	-4	-4	-5	-9	-6	-3	0	-2	-1	+2	-2	-7	-17
2071-2100	-5	-6	-7	-8	-14	-16	-5	0	+6	-4	-3	0	-12	-20	-27

Quelle: zusammengestellt aus Daten des Norddeutschen Klimaatlas, Stand 08/2012

Zukünftig ist laut Klimaberechnungen mit einer Abnahme der durchschnittlichen jährlichen Sonnenscheindauer zu rechnen. Bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts (2031-2060) werden es ca. 4% und bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) ca. 6% weniger Sonnenstunden im Jahresmittel im Vergleich zu heute (1961-1990) sein. Der Durchschnittswert der Sonnenscheindauer aus dem Zeitraum 1961-1990 beträgt für Mecklenburg-Vorpommern ca. 1.648h und für Schleswig-Holstein ca. 1.254h [berechnet aus Daten des DWD]. In

Mecklenburg-Vorpommern würde damit die jährliche Sonnenscheindauer bis Mitte des 21. Jahrhunderts durchschnittlich um 66 Stunden, bis 2100 um ca. 99 Stunden abnehmen. In Schleswig-Holstein beträgt die Abnahme bis Mitte des 21. Jahrhunderts durchschnittlich 50 Stunden, bis 2100 ca. 75 Stunden.

Auffällig ist, dass die Abnahme der Sonnenscheindauer sich hauptsächlich auf den Winter und Frühling konzentriert, während Änderungen der Sonnenscheindauer für die Sommer- und Herbstmonate sehr gering bzw. noch unklar sind. Besonders drastisch erscheint die prognostizierte Abnahme der jährlichen Sonnenscheindauer im Winter um durchschnittlich 20%, evtl. sogar bis zu 27% bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100).

4.1.2 Zusammenfassung: Folgen des Klimawandels für das natürliche Potenzial der Photovoltaik

Das natürliche Potenzial der Photovoltaik wird durch die Höhe der Globalstrahlung bestimmt. Die Höhe der Globalstrahlung schwankt zum einen aufgrund der periodisch wechselnden Sonnenaktivität und andererseits in Abhängigkeit vom Zustand der Erdatmosphäre sowie von vorherrschenden Witterungsbedingungen.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Globalstrahlung sind noch weitestgehend unklar. Allein zur Witterung gibt es Klimaberechnungen, die mögliche Veränderungen des Bedeckungsgrades sowie der Sonnenscheindauer untersuchen.

Nach aktuellem Stand der Forschungen sind die Auswirkungen des Klimawandels auf die Entwicklung des Bedeckungsgrades und damit auf die Globalstrahlung sind noch unklar.

Für die jährliche Sonnenscheindauer wird laut Klimaberechnungen eine Abnahme bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts (2031-2060) um ca. 4% und bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) um ca. 6% im Vergleich zu heute (1961-1990) prognostiziert. Dabei erfolgt die größte Abnahme von bis zu 27% hauptsächlich im Winter und Frühling. In den Sommer- und Herbstmonaten bleibt die Sonnenscheindauer im Vergleich zu heute nahezu unverändert.

Als Folge des Klimawandels ist es möglich, dass die Globalstrahlung und damit das natürliche Potenzial der Photovoltaik bis zum Ende des 21. Jahrhunderts im Jahresmittel leicht und saisonal (Winter/Frühjahr) stark abnimmt.

4.2 Einfluss des Klimawandels auf die Parameter des technischen Potenzials

Vom riesigen Energieangebot der Sonne können aufgrund technischer, struktureller und ökologischer Grenzen nur wenige Promille für den Menschen nutzbar gemacht werden. Der nutzbare Anteil vom natürlichen Potenzial der Photovoltaik, der unter Berücksichtigung dieser Kriterien übrig bleibt, wird als das technische Potenzial der Photovoltaik bezeichnet.

4.2.1 Technik

Auch unter Nutzung der aktuell besten am Markt verfügbaren Technik unterliegt die photovoltaische Energieerzeugung den Grenzen erreichbarer Wirkungsgrade und Anlagengrößen. Auf das technische Entwicklungspotenzial von Photovoltaik-Anlagen hat der Klimawandel keinen direkten Einfluss. Die Leistungsfähigkeit der Photovoltaik-Anlagen hängt in erster Linie von den anwendbaren Produktionsverfahren sowie den Eigenschaften der verwendeten Materialien (z.B. Silizium) ab.

In zweiter Instanz wird die Leistungsfähigkeit von Photovoltaik-Anlagen relativ intensiv durch die Bedingungen am Anlagenstandort beeinflusst. Voraussetzung für eine bestmögliche Ausnutzung des vorhandenen Strahlungsangebots ist ein störungsfreier Betrieb der Photovoltaik-Anlage. Dieser könnte gefährdet werden durch

- (Modul-)Temperaturen höher als 25°C,
- Verschattung der Module durch hohe Vegetation, Bebauung oder Geländeerhebungen,
- Ablagerungen auf den Modulen z.B. durch Schnee, Staub, Vogelkot oder Moosbewuchs sowie
- Schäden an der Photovoltaik-Anlage z.B. durch Extremwetterereignissen (Hagel, Sturm, Blitz).

Die Leistungsfähigkeit einer Photovoltaik-Anlage ist u.a. abhängig von der Temperatur, die an den Modulen herrscht. Mit zunehmender Temperatur sinkt die Leistung z.B. bei kristallinen Modulen mit jedem zusätzlichen Grad Celsius über 25°C um 0,5%. Dass die durchschnittlichen Lufttemperaturen sich zukünftig erhöhen, gilt als nahezu gesichert. Doch wichtiger ist hier zu wissen, wie oft die Temperaturen die Grenze von 25°C übersteigen werden. Dies geschieht an sogenannten Sommertagen und an heißen Tagen.

Das Norddeutsche Klimabüro bezeichnet einen Tag, an dem die Maximumtemperatur mindestens einmal am Tag über 25°C steigt, als Sommertag. Heiße Tage werden Tage bezeichnet, an denen die Maximumtemperatur mindestens einmal am Tag über 30°C steigt.

Die folgenden Grafiken und Tabellen stellen die aktuellen Daten zur möglichen Änderung der Anzahl der Sommertage sowie der heißen Tage bis Mitte (2031-2060) und Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zu heute (1961-1990) dar.

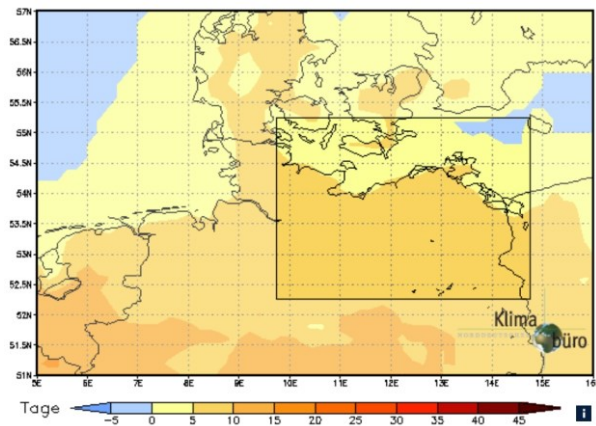


Abbildung 13: mögliche mittlere Änderung der Anzahl der Sommertage bis 2031/2060 im Vgl. zu 1961/1990 [Norddeutscher Klimaatlas 08/2012]

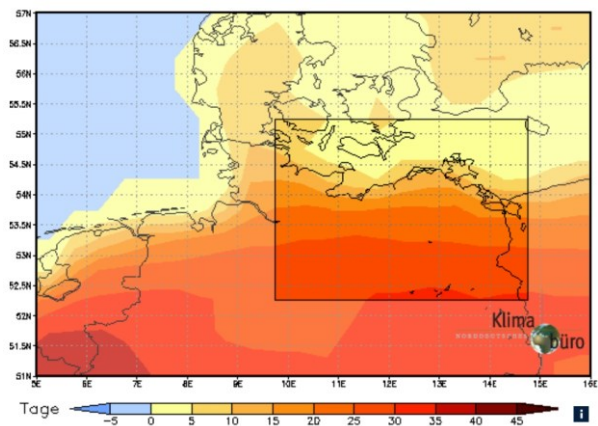


Abbildung 14: mögliche mittlere Änderung der Anzahl der Sommertage bis 2071/2100 im Vgl. zu 1961/1990 [Norddeutscher Klimaatlas 08/2012]

Tabelle 14: mögliche Änderungen der Anzahl der Sommertrage im Vgl. zu 1961/1990

Sommertage	Jahr			Frühling			Sommer			Herbst			Winter		
	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max
2031-2060	+1,7	+4,6	+7,5	-0,1	+0,4	+0,9	+1,7	+3,6	+5,5	+0,2	+1,0	+1,4	0	0	0
2071-2100	+7,4	+16,8	+38,3	0	+1,5	+3,5	+5,7	+12,2	+30,3	+0,9	+2,6	+5,5	0	0	0

Quelle: zusammengestellt aus Daten des Norddeutschen Klimaatlas', Stand 08/2012

Klimaberechnungen prognostizieren bereits bis Mitte des 21. Jahrhunderts (2031-2060) einen Anstieg der Sommertage um durchschnittlich 4,6 Tage. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) wird es zu einer Zunahme um ca. 16,8 Tage im Vergleich zu heute (1961-1990) kommen.

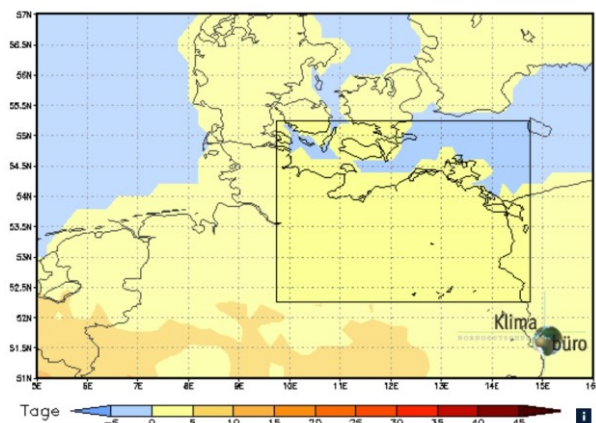


Abbildung 15: mögliche mittlere Änderung der Anzahl der heißen Tage bis 2031/2060 im Vgl. zu 1961/1990 [Norddeutscher Klimaatlas 08/2012]

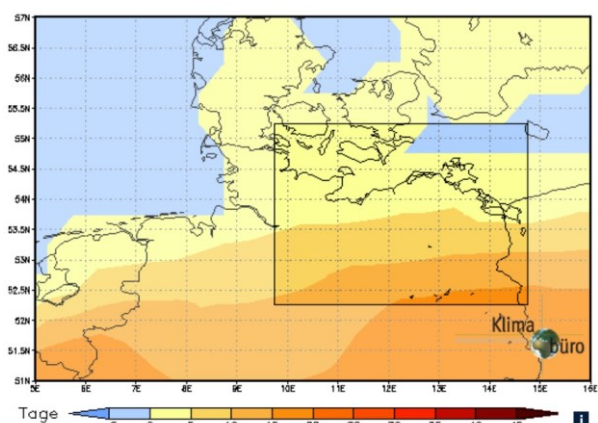


Abbildung 16: mögliche mittlere Änderung der Anzahl der heißen Tage bis 2071/2100 im Vgl. zu 1961/1990 [Norddeutscher Klimaatlas 08/2012]

Tabelle 15: mögliche Änderungen der Anzahl der heißen Tage im Vgl. zu 1961/1990

heiße Tage	Jahr			Frühling			Sommer			Herbst			Winter		
	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max
2031-2060	+0,8	+1,3	+1,9	0	+0,1	+0,2	+0,6	+1,0	+1,6	0	+0,1	+0,3	0	0	0
2071-2100	+2,1	+5,8	+14,7	+0,1	+0,3	+0,6	+1,6	+4,9	+12,7	+0,1	+0,5	+1,8	0	0	0

Quelle: zusammengestellt aus Daten des Norddeutschen Klimaatlas', Stand 08/2012

Zusätzlich zu den Sommertagen wird es voraussichtlich bis Mitte des 21. Jahrhunderts (2031-2060) einen Anstieg der heißen Tage um durchschnittlich 1,3 Tage geben. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) wird es zu einer Zunahme um ca. 5,3 Tage im Vergleich zu heute (1961-1990) kommen.

Mit der Zunahme von Sommertagen und heißen Tagen geht eine potenzielle Leistungsminderung der Photovoltaik-Anlagen einher. Bei durchschnittlich 30°C kann mit einer Leistungsminderung in Höhe von 2,5% (0,5% je 1°C) gerechnet werden. Eine gute Belüftung des Solarmoduls hält die Ertragsverluste jedoch in Grenzen. Zudem ist damit zu rechnen, dass die in den nächsten Jahren noch steigenden Wirkungsgrade der Photovoltaik-Anlagen die potenzielle Leistungsminderung kompensieren können.

Verschattungen wie Ablagerungen auf dem Solarmodul verhindern den optimalen Strahlungseintrag in die Solarzelle und führen damit zu Ertragsverlusten. Objekte, die Schatten werfen sind meist standortspezifische Faktoren, die bereits bei der Standortplanung von Photovoltaik-Anlagen, z.B. mithilfe einer Verschattungsanalyse, berücksichtigt werden sollten. Potenzielle Ablagerungen treten teils standortspezifisch auf, hängen zum Teil aber auch von klimatischen Bedingungen ab. Schneefall tritt z.B. vorwiegend in nördlicheren Breitengraden unter gemäßigten bis arktischen Klimaverhältnissen auf.

Laut Klimaberechnungen wird für die deutsche Ostseeregion bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) eine Abnahme der Schneetage um durchschnittlich drei Tage im Vergleich zu heute (1961-1990) erwartet. Bis Mitte des 21. Jahrhunderts (2031-2060) beträgt die Abnahme durchschnittlich eine Tag. Eine Abnahme der durchschnittlichen Anzahl der Schneetage im Jahr führt, wenn auch nur gering, potenziell zu besseren Ertragsbedingungen. Zudem verringert sich die Gefahr von Schäden an der Anlage durch zu hohe Schneelasten. Allerdings wird es infolge des Klimawandels sehr wahrscheinlich zu einem häufigeren Auftreten von Extremwetterereignissen kommen, was wiederum zu der erhöhten Gefahr für Schäden und Ertragsverlusten bei der Solarstromproduktion führen kann.

4.2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die die Photovoltaik betreffenden rechtlichen Regelungen dienen vor allem der Steuerung der Standortplanung von Photovoltaik-Anlagen mit dem Ziel beeinträchtigende Umweltauswirkungen zu vermeiden (NatSchG) und räumliche Konflikte zu verringern (ROG).

Um nachhaltige Beeinträchtigungen der Umwelt zu vermeiden bzw. so gering wie möglich zu halten, ist der zukünftige Anlagenstandort sorgfältig auszuwählen. Grundsätzlich sind Flächen zu wählen, die eine hohe Vorbelastung und somit eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Eingriffen aufweisen. Als solche Vorbelastung kommen in Frage:

- wesentliche Beeinträchtigung der Biotop-, Biotopverbund- und Habitatfunktion (z.B. durch Lärm),
- starke Belastung der Bodenfunktion (z.B. durch Versiegelung, Bodenverdichtung oder Kontamination),
- erheblich verfremdetes Landschaftsbild durch Bebauung oder andere technische Objekte wie Verkehrswege.

Im Umkehrschluss sind von der Überbauung mit Photovoltaik-Anlagen Flächen auszuschließen, die

- natur- bzw. artenschutzrechtlich von hoher Bedeutung sind und daher aufgrund eu-, bundes- und landesrechtlicher Regelungen einem besonderen Schutz unterliegen (z.B. Natura 2000, Nationalparks, Naturschutzgebiete, Naturdenkmäler, geschützte Biotope nach § 30c BNatSchG usw.),
- bodenschutzrechtlich von hoher Bedeutung sind (z.B. Böden mit hoher natürlicher Ertragsfähigkeit sowie naturnahe oder kulturhistorische Böden),
- natürliche oder tatsächliche Überschwemmungsgebiete oder Gebiete für den vorbeugenden Hochwasserschutz darstellen,
- Gebiete mit klimatischer Ausgleichsfunktion (Kaltluftentstehung, -abfluss, Luftaustauschbahnen) darstellen,
- unzerschnittene, kulturhistorische Landschaftsräume oder Gebiete mit besonders hohem Landschaftsbildpotenzial darstellen,
- Gebiete mit Bedeutung für die siedlungsnah sowie landschaftsbezogene Erholung.

Das der Klimawandel Auswirkungen auf die Natur und Landschaft haben wird, steht außer Frage, doch werden sie aufgrund der komplexen ökologischen Wechselwirkungen noch wenig verstanden. Sicher ist, dass die direkten Wirkungen des Klimawandels wie z. B. Temperaturerhöhung oder Veränderung der Niederschlagsverhältnisse einen erheblichen Anpassungsdruck auf die Ökosysteme und die Biodiversität erzeugen. Es kann von einer erheblichen Veränderung von Flora, Fauna und Ökosystemen ausgegangen werden, so z.B. in Form von

- Verschiebung der Klima- und damit der Vegetationszonen nach Norden,
- Verlängerung der Vegetationsperioden,
- Abwanderung bzw. Aussterben hochangepasster sensibler Arten
- Arealausweitung gewöhnlicher Arten und
- Zuwanderung wärmeliebender Arten (z.B. aus dem Mittelmeerraum).

Im Folgenden werden einige mögliche Entwicklungen von Natur und Landschaft betrachtet, die zu Veränderungen des technischen Potenzials der Photovoltaik führen könnten.

Durch den Klimawandel könnten sich die Potenziale des Naturhaushaltes und der Landschaft derartig verschlechtern bzw. verändern, so dass bisher unter Schutz stehende Landschaftsteile als nicht mehr schützenswert eingestuft werden und damit theoretisch für eine wirtschaftliche Nutzung (z.B. durch Photovoltaik) zur Verfügung stehen. Da aber im Rahmen des Klimaschutzes zunehmend auch der Naturschutz intensiviert bzw. angepasst wird, liegt hier kaum Potenzial für zusätzliche Photovoltaik-Flächen vor.

Durch den Meeresspiegelanstieg und die zunehmenden winterlichen Niederschläge kann es vermehrt zu Überschwemmungen an Seen, Flüssen und anderen Gewässern kommen. Hier wäre nach bisherigen Kriterien der Bau von Photovoltaik-Anlagen ausgeschlossen.

Durch zunehmende Hitzewellen in Verbindung mit starkem Wassermangel kann die Produktion der Vegetation, so z.B. in der Landwirtschaft, stark zurückgehen. Als Folge der immer öfter auftretenden Dürren könnte sich die Ertragsfähigkeit einiger Böden so nachhaltig verschlechtern, dass sich Landwirtschaft auf ihnen nicht mehr lohnt. Diese Flächen könnten dann für den Betrieb Photovoltaik-Anlagen zur Verfügung gestellt werden.

Wie sich Natur und Landschaft durch den Klimawandel mittel- und vor allem langfristig entwickeln werden, ist noch unklar. Es wird jedoch ersichtlich, dass mit zunehmendem Klimadruck auf die Natur und Landschaft auch der gesellschaftliche und politische Wille diese zu erhalten, wächst. Daher ist davon auszugehen, dass durch die Auswirkungen des Klimawandels sich kurzfristig keine zusätzlichen (Frei-)Flächenpotenziale für die Photovoltaik-Nutzung ergeben.

4.2.3 Zusammenfassung: Folgen des Klimawandels für das technische Potenzial der Photovoltaik

Das technische Potenzial der Photovoltaik ist der Anteil des natürlichen Potenzials, der unter Berücksichtigung der Grenzen der Nutzungstechnologien sowie der Verfügbarkeit von Flächen unter Beachtung infrastruktureller und ökologischer Restriktionen tatsächlich nutzbar gemacht werden kann.

Auf das technische Potenzial nimmt der Klimawandel im Wesentlichen durch die Zunahme der Sommertage und der heißen Tage Einfluss. An diesen Tagen herrschen Temperaturen über 25°C, was sich im Allgemeinen leistungsmindernd auf die Solarmodule auswirkt. Für Ertragsverluste können auch Schäden infolge vermehrter Extremwetterereignisse sorgen. Eine mögliche Abnahme der Anzahl von Schneetagen sorgt im geringen Maß für eine Verbesserung der Ertragsbedingungen sowie für ein vermindertes Schadenspotenzial infolge von Schneelasten.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Verfügbarkeit von Flächen für die Photovoltaik-Nutzung sind noch unklar. Einerseits könnte das Flächenpotenzial durch die Zunahme von Überschwemmungsflächen abnehmen, andererseits könnten neue potenzielle Flächen hinzukommen, weil Ackerflächen durch verminderte Ertragswerte aus der landwirtschaftlichen Nutzung genommen werden könnten. Es ist davon auszugehen, dass durch die Auswirkungen des Klimawandels sich kurzfristig keine zusätzlichen (Frei-)Flächenpotenziale für die Photovoltaik-Nutzung ergeben.

4.3 Einfluss des Klimawandels auf die Parameter des wirtschaftlichen Potenzials

Das wirtschaftliche Potenzial umfasst den Anteil des technischen Potenzials, der wirtschaftlich konkurrenzfähig (wettbewerbsfähig) genutzt werden kann. Es ist abhängig von konkurrierenden Systemen sowie vom vorherrschenden Energiepreisgefüge und stellt im Idealfall die Kosten-Nutzen-Situation ohne Berücksichtigung von Fördermaßnahmen dar.

Das wirtschaftliche Potenzial der Photovoltaik in Deutschland hängt aktuell noch stark von der staatlichen Förderpolitik ab. Ziel ist jedoch die Wirtschaftlichkeit des Solarstroms unabhängig von der Einspeisevergütung. Dank der bereits stark gesunkenen Stromgestehungskosten konnte in diesem Jahr (2012) in Deutschland der Punkt der Netzparität erreicht werden. Aus Sicht des privaten Stromverbrauchers, welcher mit Solarstrom seinen eigenen Strombedarf deckt, wurde der Solarstrom hiermit wettbewerbsfähig.

Aus Sicht der Energieversorger wird es bis zur Wettbewerbsfähigkeit von Solarstrom jedoch noch so lange dauern, bis dieser den Strom beim Solaranlagenbetreiber günstiger einkaufen kann als an der Strombörse. Dieser Fall tritt bisher nur dann ein, wenn an sonnenreichen Sommertagen durch die Solaranlagen maximale Solarstromerträge erbracht werden. Eine weitgehende Wettbewerbsfähigkeit der Photovoltaik unabhängig von Fördermaßnahmen kann daher nur über die Lösung des Speicherproblems erreicht werden. Denn die Solarstromproduktion schwankt aufgrund von Tages- und Jahreszeiten. Die notwendige Lösung heißt durch Speichermedien den Stromüberschuss aus sonnenreichen Zeiten auch für die weniger sonnenreichen Zeiten nutzbar zu machen.

Die reale Wirtschaftlichkeit (ohne Förderung) hängt von den Faktoren Aufwand (Kosten) und Ertrag ab. Eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit ist grundsätzlich durch Kostensenkung und/oder durch Ertragsteigerung zu erreichen.

Eine Senkung der Investitions- wie auch Nebenkosten von Photovoltaik-Anlagen ist u.a. durch die Optimierung der Herstellungsverfahren und Materialeinsparungen sowie durch eine Qualitätssteigerung der Technologien, die für eine geringere Störanfälligkeit im Betrieb sorgt, zu erreichen. Diese Faktoren sind hauptsächlich technologiespezifisch und entwickeln sich unabhängig vom Klimawandel.

Auswirkungen des Klimawandels auf die Kosten einer Photovoltaik-Anlage können im Fall von Extremwetterereignissen (Hagel, Sturm, Blitz) eintreten. Als Folge des Klimawandels steigt die Wahrscheinlichkeit, dass sich Extremwetterereignisse wie Hitzewellen, Dürreperioden aber auch Überschwemmungen und starke Stürme ereignen. Die technische Anpassung der Photovoltaik-Anlagen an stärkere Belastung durch extreme Witterungsbedingungen kann zur Erhöhung der Investitionskosten führen. Auch die erhöhte Wahrscheinlichkeit sowie das vermehrte Aufkommen von Schäden an den Anlagen durch Extremwetterereignisse führen zu erhöhten Kosten für Versicherungen und Reparaturen.

Der mögliche energetische und damit der finanzielle Ertrag einer Photovoltaik-Anlage hängen zum einen von der Höhe der Globalstrahlung (natürliches Potenzial) am jeweiligen Standort ab. Je höher das Strahlungsangebot ist, desto mehr Solarstrom kann erzeugt werden. Zum anderen trägt das technische Potenzial entscheidend zum Ertrag bei. Hohe Wirkungsgrade sowie optimale Betriebsbedingungen sorgen für einen hohen Energieertrag.

Die mögliche Entwicklung des natürlichen und technischen Potenzials der Photovoltaik unter dem Einfluss des Klimawandels wurde in Kapitel 4.1 und 4.2 betrachtet. Als Folge des Klimawandels ist es möglich, dass die Potenziale leicht abnehmen können. Ein klarer Trend ist jedoch nicht zu erkennen.

Der Klimawandel wird weiterhin Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der Photovoltaik haben, indem durch ihn sich der saisonale Strombedarf verändert. Durch die steigenden Lufttemperaturen hat bereits jetzt der Strombedarf in den Sommermonaten infolge erhöhter Kühlenergiebedarfe stark zugenommen. Dieser zusätzliche Strombedarf kann kostengünstig durch die Photovoltaik gedeckt werden, da im Moment des Bedarfs auch das Angebot stark zunimmt. Durch eine dezentrale Nutzung des „eigenen“ Solarstroms kann zudem einer Überlastung der öffentlichen Stromnetze durch Einspeisespitzen vorgebeugt werden.

4.3.1 Zusammenfassung: Folgen des Klimawandels für das wirtschaftliche Potenzial der Photovoltaik

Potenziell kann der Klimawandel sich auf die Wirtschaftlichkeit der Photovoltaik auswirken, indem durch ihn die Faktoren Kosten und Ertrag verändert werden. Eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit ist grundsätzlich durch Kostensenkung und/oder durch Ertragsteigerung zu erreichen. Umgekehrt führen Kostensteigerung und Ertragsminderung zur Verschlechterung der Wirtschaftlichkeit.

Vermeehrt auftretende Extremwetterereignisse infolge des Klimawandels können Kostensteigerungen sowie auch Ertragsverluste verursachen. Erhöhte Kosten entstehen hier z.B. durch die verstärkte technische sowie finanzielle Absicherung der Anlagen vor Sturmschäden bzw. für die Reparatur von diesen. Sturmschäden wären auch der Grund für potenziell erhöhte Ertragsverluste.

Ertragsmindernd wirkt sich der Klimawandel zudem über die Beeinflussung des natürlichen wie auch des technischen Potenzials der Photovoltaik aus. Als Folge des Klimawandels ist es möglich, dass diese Potenziale leicht abnehmen können. Ein klarer Trend ist jedoch nicht zu erkennen.

Positiv kann sich der Klimawandel auf die Wirtschaftlichkeit der Photovoltaik auswirken, durch seinen Einfluss auf die Energienachfrage. Denn in den Sommermonaten, wenn durch die Photovoltaik Spitzenerträge erbracht werden können, steigt durch den Klimawandel der Bedarf an Kühlenergie und dadurch die Stromnachfrage. Diesen Strombedarf kann der Solaranlagenbetreiber schon heute aus der eigenen Produktion kostengünstig decken.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf das wirtschaftliche Potenzial der Photovoltaik kann einerseits negativer (potenzielle Kostensteigerung, Ertragsminderung) und andererseits positiver Natur (potenziell höhere Nachfrage) sein. Generell entwickelt sich das wirtschaftliche Potenzial der Photovoltaik jedoch abhängig von der Weiterentwicklung der Technologien, so dass der Einfluss des Klimawandels hier vernachlässigbar ist.

5 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht ist das Ergebnis des Arbeitspaketes 1.7.4 des Fokusthemas Erneuerbare Energien im Forschungsprojekt Radost – Regionale Anpassungsstrategien für die deutsche Ostseeküste. Ziel dieses Berichts war die Analyse und Prognose der Potenziale der Photovoltaik an der deutschen Ostseeküste unter dem Einfluss des Klimawandels. Dabei wurde folgende Vorgehensweise gewählt.

1. Erläuterungen zur Photovoltaik und ihren Potenzialparametern
2. Betrachtung des Klima und des Klimawandels an der deutschen Ostseeküste
3. Ermittlung eventueller Veränderungen der Potenzialparameter durch den Klimawandel und Schlussfolgerung der Entwicklungsperspektiven der Photovoltaik aufgrund veränderter Potenzialparameter

Grundlage für die Betrachtungen in diesem Bericht bildeten unter anderem die Ergebnisse der Arbeitspakete 1.7.1 „Bericht über die Umweltparameter der erneuerbaren Energien“ und 1.7.2 „Matrix der Umweltparameter der erneuerbaren Energien“.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus der Analyse und Prognose der Potenziale der Photovoltaik unter dem Einfluss des Klimawandels lauten folgendermaßen:

Natürliches Potenzial

Das natürliche Potenzial der Photovoltaik wird durch die Höhe der Globalstrahlung bestimmt. Die Höhe der Globalstrahlung schwankt zum einen aufgrund der periodisch wechselnden Sonnenaktivität und andererseits in Abhängigkeit vom Zustand der Erdatmosphäre sowie von vorherrschenden Witterungsbedingungen. Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Globalstrahlung sind noch weitestgehend unklar. Allein zur Witterung gibt es Klimaberechnungen, die mögliche Veränderungen des Bedeckungsgrades sowie der Sonnenscheindauer untersuchen.

Nach aktuellem Stand der Forschungen sind die Auswirkungen des Klimawandels auf die Entwicklung des Bedeckungsgrades und damit auf die Globalstrahlung sind noch unklar. Für die jährliche Sonnenscheindauer wird laut Klimaberechnungen eine Abnahme bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts (2031-2060) um ca. 4% und bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) um ca. 6% im Vergleich zu heute (1961-1990) prognostiziert. Dabei erfolgt die größte Abnahme von bis zu 27% hauptsächlich im Winter und Frühling. In den Sommer- und Herbstmonaten bleibt die Sonnenscheindauer im Vergleich zu heute nahezu unverändert.

Als Folge des Klimawandels ist es möglich, dass die Globalstrahlung und damit das natürliche Potenzial der Photovoltaik bis zum Ende des 21. Jahrhunderts im Jahresmittel leicht und saisonal (Winter/Frühjahr) stark abnimmt.

Technisches Potenzial

Auf das technische Potenzial nimmt der Klimawandel im Wesentlichen durch die Zunahme der Sommertage und der heißen Tage Einfluss. An diesen Tagen herrschen Temperaturen über 25°C, was sich im Allgemeinen leistungsmindernd auf die Solarmodule auswirkt. Für Ertragsverluste können auch Schäden infolge vermehrter Extremwetterereignisse sorgen. Eine mögliche Abnahme der Anzahl von Schneetagen sorgt im geringen Maß für eine

Verbesserung der Ertragsbedingungen sowie für ein vermindertes Schadenspotenzial infolge von Schneelasten.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Verfügbarkeit von Flächen für die Photovoltaik-Nutzung sind noch unklar. Einerseits könnte das Flächenpotenzial durch die Zunahme von Überschwemmungsflächen abnehmen, andererseits könnten neue potenzielle Flächen hinzukommen, weil Ackerflächen durch verminderte Ertragswerte aus der landwirtschaftlichen Nutzung genommen werden könnten. Es ist davon auszugehen, dass durch die Auswirkungen des Klimawandels sich kurzfristig keine zusätzlichen (Frei-)Flächenpotenziale für die Photovoltaik-Nutzung ergeben.

Wirtschaftliches Potenzial

Die Auswirkungen des Klimawandels auf das wirtschaftliche Potenzial der Photovoltaik kann einerseits negativer (potenzielle Kostensteigerung, Ertragsminderung) und andererseits positiver Natur (potenziell höhere Nachfrage) sein.

Vermeehrt auftretende Extremwetterereignisse infolge des Klimawandels können Kostensteigerungen sowie auch Ertragsverluste verursachen. Erhöhte Kosten entstehen hier z.B. durch die verstärkte technische sowie finanzielle Absicherung der Anlagen vor Sturmschäden bzw. für die Reparatur von diesen. Sturmschäden wären auch der Grund für potenziell erhöhte Ertragsverluste. Ertragsmindernd wirkt sich der Klimawandel zudem über die Beeinflussung des natürlichen wie auch des technischen Potenzials der Photovoltaik aus. Als Folge des Klimawandels ist es möglich, dass diese Potenziale leicht abnehmen können. Ein klarer Trend ist jedoch nicht zu erkennen.

Positiv kann sich der Klimawandel auf die Wirtschaftlichkeit der Photovoltaik auswirken, durch seinen Einfluss auf die Energienachfrage. Denn in den Sommermonaten, wenn durch die Photovoltaik Spitzenenerträge erbracht werden können, steigt durch den Klimawandel der Bedarf an Kühlenergie und dadurch die Stromnachfrage. Diesen Strombedarf kann der Solaranlagenbetreiber schon heute aus der eigenen Produktion kostengünstig decken.

Zusammengefasst wird der Klimawandel keine gravierenden Auswirkungen auf die Solarstromerzeugung mittels Photovoltaik-Technologien haben. Die Entwicklung des natürlichen Potenzials unklar. Hier besteht weiterhin Forschungsbedarf über die Entwicklung der Zusammensetzung der Erdatmosphäre sowie der Klimaparameter Bedeckung und Sonnenscheindauer. Der Einfluss des Klimawandels auf das technische Potenzial ist einerseits vernachlässigbar, da die technische Entwicklung die Auswirkungen z.B. der erhöhten Temperaturen mehr als kompensieren wird. Auf der anderen Seite sind die Auswirkungen des Klimawandels auch hier noch nicht ausreichend bekannt um z.B. die Entwicklung ökologischer Restriktionen und damit der potenziellen (Frei-)Flächenverfügbarkeit für Photovoltaik-Nutzung absehen zu können. Zuletzt entwickelt sich auch das wirtschaftliche Potenzial der Photovoltaik v.a. in Abhängigkeit von der Weiterentwicklung der Technologien, so dass der Einfluss des Klimawandels hier ebenfalls als vernachlässigbar anzusehen ist.

Literaturverzeichnis

- BDEW 26.06.12 Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Online-Presseinformation vom 26.06.2012 mit dem Titel "Erneuerbare Energien liefern mehr als ein Viertel des Stroms", URL: http://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE_Home
- BMU 2007 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): "Leitfaden zur Berücksichtigung von Umweltbelangen bei der Planung von PV-Freiflächenanlagen" bearbeitet durch die ARGE Monitoring PV-Anlagen, Stand 28.11.2007
- BMU 2012a Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2012): Erneuerbare Energien 2011, vorläufige Fassung Stand 08.03.2012
- BMU 2012b Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Informationen zur Novellierung des EEG 2012 durch die PV-Novelle, Stand 24.08.2012
- BMWi 2012 Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2012): Ausgewählte Grafiken zu Energiepreisen und –kosten, Stand 19.04.2012, URL: www.bmwi.de
- BSW 04.07.12 Bundesverband Solarwirtschaft e.V., Online-Presseinformation vom 04.07.2012 mit dem Titel "Solarstrom-Rekord - Strom für 8,3 Millionen Haushalte", URL: <http://www.solarwirtschaft.de/>
- DCTI 2012 Deutsches CleanTech Institut GmbH (DCTI): CleanTech Studienreihe Photovoltaik "Branchenführer PV 2012 - Fakten und Akteure", Fassung Juli 2012, URL: <http://www.dcti.de/>
- Dengler 2010 Dengler C. (2010): Umweltparameter erneuerbarer Energien - Ermittlung relevanter Umweltparameter für die erneuerbaren Energien: Geothermie, Photovoltaik, Windenergie, Biogas - RADOST-Berichtsreihe, Bericht Nr. 2, ISSN: 2192-3140
- DIN 1349 DIN 1349-1:1972-06 "Durchgang optischer Strahlung durch Medien; Optisch klare Stoffe, Größen, Formelzeichen und Einheiten"
- DLR 2010 BlogPortal des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR): Energie-Blog-Eintrag vom 12.01.2010 "Energie-Frage der Woche: Wie viel Energie schickt uns die Sonne jeden Tag?", URL: www.dlr.de/blogs/desktopdefault.aspx/tabid--6192/10184_read-22
- DWD Deutscher Wetterdienst, URL: www.dwd.de
- DWD 2010 Deutscher Wetterdienst (2010): Zahlen und Fakten zur DWD-Pressekonferenz am 27. April 2010 in Berlin
- DWD 2011 Deutscher Wetterdienst (DWD): Broschüre "Globalstrahlung - Die Energie der Sonne", Stand 05.2011

Fraunhofer 2012a	Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme (ISE): Studie Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien, Version: 30. Mai 2012, URL: http://www.ise.fraunhofer.de/de
Fraunhofer 2012b	Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme (ISE): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, Fassung vom 27.07.2012, URL: http://www.ise.fraunhofer.de/de
mp-tec 2012	mp-tec GmbH & Co. KG: Datenblatt: Nachführanlage skytrap light, Stand März 2012, URL: http://www.mp-tec.de/
Norddeutscher Klimaatlas	Norddeutscher Klimaatlas, Anbieter: Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH, URL: http://www.norddeutscher-klimaatlas.de/
Norddeutsches Klimabüro 2011	Norddeutsches Klimabüro (2011): Regionale Klimaszenarien in der Praxis, Beispiel deutsche Ostseeküste, Stand Mai 2011, URL: http://www.norddeutsches-klimabuero.de/
PV-M-V 2010	Ministerium für Energie, Infrastruktur und Landesentwicklung (2010): Großflächige Photovoltaik-Anlagen im Außenbereich - Hinweise für die raumordnerische Bewertung und die baurechtliche Beurteilung
Solaranlagen-Portal 2012	Abfragen zum thema Photovoltaik von der Online-Informationsplattform Solaranlagen-Portal, Betreiber: scon-marketing GmbH, URL: http://www.solaranlagen-portal.de/ , Zeitraum der Abfrage: Mai-August 2012
WM MV 2011	Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Mecklenburg-Vorpommern (2011): Aktionsplan Klimaschutz Mecklenburg-Vorpommern 2010, Teil A - Grundlagen und Ziele

Impressum

Herausgeber

Ecologic Institut gemeinnützige GmbH
Pfalzburger Str. 43/44
10717 Berlin
www.ecologic.eu

Inhalt erstellt durch:

GICON – Großmann Ingenieur Consult GmbH
Rosa-Luxemburg-Straße 25/26
18055 Rostock
<http://www.gicon.de>

Web

<http://www.klimzug-radost.de>

Bildrechte

Deckblatt: Abbildung rechts: © Cindy Dengler
Foto links: © Q-Cells SE

ISSN 2192-3140

Das Projekt "Regionale Anpassungsstrategien für die deutsche Ostseeküste" (RADOST) wird im Rahmen der Maßnahme „Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten“ (KLIMZUG) vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert

